MODELO HIDROLÓGICO SMAP COMO FERRAMENTA DE APOIO AO DESPACHO OPERACIONAL DO SISTEMA CANTAREIRA

Helen Graciane Ruela Machado [1] ; Rafael Grinberg Chasles [2]; João Rafael Bergamaschi Tercini [3]

Palavras-Chave – Chuva-Vazão, Sistema Cantareira, Modelo Hidrológico.

INTRODUÇÃO

O Sistema Cantareira, localizado no estado de São Paulo e algumas cabeceiras em Minas Gerais, apresenta vazão afluente média anual de 38,87 m³/s, com variações históricas (1982–2026) que oscilam entre 21,45 m³/s nos períodos secos e 64,45 m³/s nos chuvosos (SP-ÁGUAS, 2026). Esse sistema abastece cerca de 14 milhões de pessoas na Região Metropolitana de São Paulo e bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí - PCJ (ZUFFO et al., 2023). A operação do sistema, composto pelos reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro, é regulada pela Resolução Conjunta ANA/DAEE nº 925/2017. Esta norma define faixas operativas com base no volume útil dos reservatórios, estipulando vazões médias móveis de 15 dias para postos de controle específicos. Nas Faixas 1 e 2 (Normal e Atenção), as vazões são de 12,0 m³/s no posto Captação de Valinhos (Rio Atibaia), 3,0 m³/s em Atibaia (Rio Atibaia) e 2,5 m³/s em Buenópolis (Rio Jaguari). Nas Faixas 3 e 4 (Alerta e Restrição), esses limites mínimos passam para 11,0 m³/s, 2,0 m³/s e 2,0 m³/s, respectivamente. Adicionalmente, são permitidas variações momentâneas, desde que respeitadas as vazões mínimas médias diárias de 10,0 m³/s em Valinhos e 2,0 m³/s nos demais postos. A Figura 1 ilustra a localização dos postos de monitoramento e suas respectivas áreas de influência: os postos Atibaia e Valinhos são utilizados para monitorar as vazões dos reservatórios Cachoeira e Atibainha, enquanto o posto Buenópolis monitora o reservatório Jaguari.

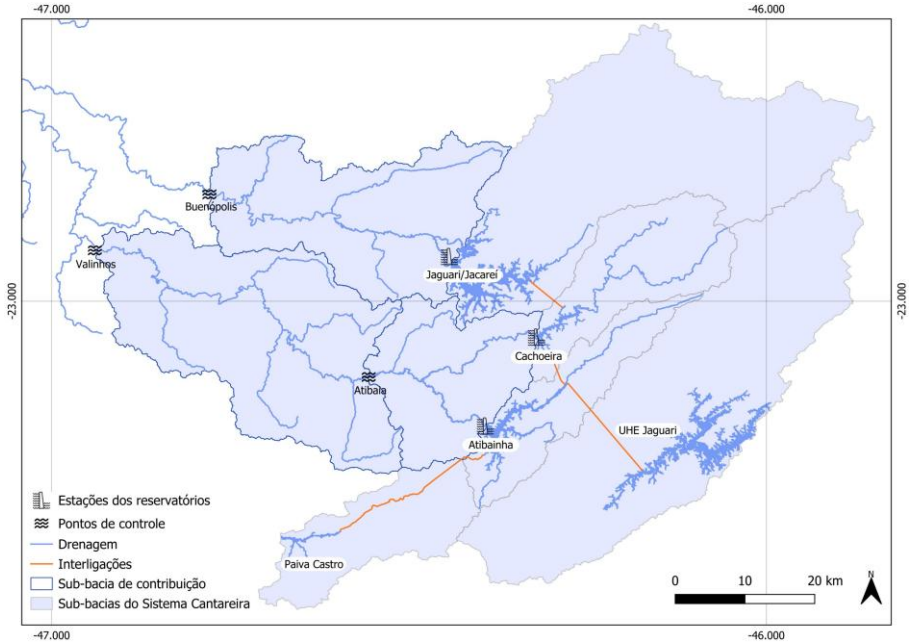


Figura 1: Localização da área de estudo nas sub-bacias de contribuição do Sistema Cantareira. Fonte: autoria própria.

1) Agência de Águas do Estado de São Paulo, Superintendência de Segurança Hídrica, hgrmachado.hcc3@spaguas.sp.gov.br
2) Agência de Águas do Estado de São Paulo, Superintendência de Segurança Hídrica, rgchasles@spaguas.sp.gov.br
3) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, tercini@usp.br

Diariamente são emitidos relatórios pela Sala de Situação PCJ (SSPCJ) em conjunto com a Agência de Águas do Estado de São Paulo (SP-Águas), indicando a situação das vazões observadas nos reservatórios e das vazões descarregadas para os rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ). Porém, as informações para as análises e tomadas de decisões ainda necessitam de automatizações e dinamismo. Nesse sentido, com o intuito de criar ferramentas que auxiliem na gestão de despacho do Sistema Cantareira para o abastecimento da Grande São Paulo, foi desenvolvido uma aplicação em *Python* com o modelo hidrológico chuva-vazão baseado no SMAP (*Soil Moisture Accounting Produce*) de forma que garanta a manutenção das vazões mínimas obrigatórias para as bacias dos rios da bacia do PCJ, conforme Resolução Conjunta ANA/DAEE N°925.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a construção do modelo do despacho neste trabalho se baseia em Tercini et al. (2023), que combina o modelo hidrológico SMAP com modelos climáticos para calcular a estimativa das vazões baseada nos dados de chuva. Os modelos climáticos adotados foram o WRF (*Weather Research and Forecasting*), GFS (*Global Forecast System)* e o GEFS (*Global Ensemble Forecast System)*, na Tabela 1, estão descritas as especificações de cada modelo climático utilizado:

Tabela 1 – Modelos climáticos de previsão de precipitação:

	WRF	**GFS**	**GEFS**
Resolução	7 km	25 km	25 km
Previsão	7 dias (1h)	16 dias (3h)	16 dias (3h)
Variável	APCPsfc (kg/m²)	APCP (kg/m²/s)	APCP (kg/m²/s)
Fonte	INPE	NOAA/NCEP	NOAA/NCEP
Descrição	Modelo regional de mesoescala, utiliza o acumulado total na superfície	Modelo global determinístico da chuva acumulada	Ensemble de 30 membros, utiliza a precipitação acumulada quantificando a incerteza da previsão

Os dados climáticos foram utilizados como uma das variáveis de entrada para o SMAP (LOPES et. al, 1982), que é um modelo hidrológico determinístico usado principalmente para simular a transformação da chuva em vazão em uma bacia hidrográfica, possibilitando diferentes simulações para a análise de resposta das bacias. Os parâmetros de bacia foram baseados em Tercini e Mello Júnior (2023). Para os trechos avaliados, foram adotados tempos de trânsito de 3,5 dias para o rio Jaguari, 3 dias para o rio Cachoeira e 5 dias para o rio Atibainha. O coeficiente de amortecimento utilizado foi X=0,3, representando a atenuação da onda de cheia durante a propagação.

A avaliação preliminar do desempenho das previsões do modelo do despacho foi realizada utilizando as métricas estatísticas *Kling-Gupta Efficiency* (KGE) e *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), permitindo comparar os valores simulados pelo modelo hidrológico com os dados observados. Foram calculadas as métricas *Mean Absolute Error* (MAE) e *Root Mean Square Error* (RMSE), para quantificar a magnitude dos erros entre as vazões previstas e observadas, e o viés percentual (Viés %), para identificar tendências de superestimativa ou subestimativa das vazões pelo modelo.

Para a análise, foi utilizada uma base de dados composta pelas observações de vazão disponíveis até o dia 16 de junho de 2026, considerando um histórico retroativo de 10 dias para a inicialização do modelo. A previsão meteorológica foi obtida a partir do modelo atmosférico WRF, utilizando a precipitação prevista para um horizonte de três dias como entrada do modelo hidrológico. Durante o período analisado, o Sistema Cantareira encontrava-se na Faixa II (Atenção) de operação. Conforme

os procedimentos operacionais adotados pela SSPCJ e pela SP-Águas, foram consideradas para a simulação as vazões de descarga previstas para os próximos 10 dias, correspondentes a 0,25 m³/s para o reservatório Jaguari, 4,0 m³/s para Cachoeira e 4,0 m³/s para Atibainha. Esses valores foram incorporados ao modelo como condições operacionais para a previsão das vazões. A avaliação preliminar do desempenho foi realizada comparando as previsões geradas com os dados observados subsequentes, considerando as vazões previstas a partir da rodada de 16 de junho de 2026 para os dias 17 e 18 de junho de 2026.

Para integração, processamento e visualização dos dados hidrometeorológicos, foi desenvolvido um ambiente computacional em Python, utilizando a interface Streamlit, com o objetivo de integrar e disponibilizar de forma dinâmica os dados observados e as previsões provenientes dos modelos climáticos obtidos via API. A plataforma foi estruturada utilizando bibliotecas voltadas ao processamento, análise e visualização de dados geoespaciais e hidrológicos, incluindo *pandas, geopandas, shapely, numpy, folium, leafmap, rasterio e rioxarray.*

RESULTADOS

A avaliação preliminar do desempenho do modelo do despacho, considerando as previsões realizadas em 16 de junho de 2026 para os dias 17 e 18 de junho de 2026, indicou tendência de subestimativa das vazões simuladas em relação aos valores observados, com vieses variando entre -5,97% e -13,56%. Os valores de MAE inferiores a 1,5 m³/s demonstram que as diferenças entre as vazões previstas e observadas permaneceram reduzidas no período avaliado.

As métricas de eficiência apresentaram comportamento distinto entre as estações analisadas. Os valores de KGE variaram entre 0,455 e 0,842, indicando desempenho satisfatório na representação da dinâmica das vazões, com melhor resultado para a estação de Valinhos (KGE = 0,842). Os valores de NSE negativos estão associados ao curto período de validação, composto por apenas dois dias de comparação, e à baixa variabilidade das vazões observadas, tornando essa métrica sensível para amostras reduzidas. Dessa forma, os resultados apresentados possuem caráter preliminar, sendo necessária a ampliação da série de avaliação para uma análise estatística mais representativa. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultado da avaliação preliminar do modelo do despacho

Área	Nº de pares	NSE	KGE	MAE (m³/s)	RMSE (m³/s)	Viés (%)
Atibaia	2	-6,285	0,474	1,147	1,169	-8,02
Jaguari	2	-3,886	0,455	1,341	1,381	-13,56
Valinhos	2	-0,255	0,842	1,422	1,434	-5,97

A ferramenta desenvolvida (Figura 2) permite a análise de cenários operacionais por meio da edição manual das vazões e comparação com diferentes metas de operação (ótima, mínima, constante e personalizado). Foram integradas previsões meteorológicas dos modelos WRF (3 dias), GFS e GEFS (10 dias), com processamento das precipitações pelo modelo chuva-vazão SMAP e apresentação dinâmica das vazões previstas. A plataforma também disponibiliza mapas interativos de precipitação acumulada, com filtros por modelo e horizonte de previsão, além da atualização automática dos produtos. Adicionalmente, foi implementada a inserção de chuvas personalizadas para avaliação de cenários hipotéticos e uma tabela dinâmica com os dados observados e simulados. A ferramenta encontra-se disponível em: https://apps.spaguas.sp.gov.br/despacho_cantareira.



Figura 2: Recorte da interface gráfica do sistema web desenvolvido para o modelo do despacho. Fonte: autoria própria.

CONCLUSÕES

A aplicação web desenvolvida apresenta potencial para auxiliar a tomada de decisão operacional do Sistema Cantareira, integrando informações meteorológicas, simulação hidrológica e avaliação de diferentes estratégias de descarga. A ferramenta encontra-se em processo de avaliação pela Sala de Situação PCJ, contribuindo para o aprimoramento dos procedimentos operacionais por meio da incorporação de novas análises, incluindo a avaliação contínua da acurácia dos modelos de previsão meteorológica, o refinamento das vazões considerando a reversão para Jundiaí no posto de Valinhos e a adequação dos tempos de trânsito utilizados no modelo de propagação. Essas melhorias visam aumentar a confiabilidade das previsões e ampliar o suporte técnico à gestão dos recursos hídricos do Sistema Cantareira.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Sistema Cantareira. Brasília: ANA. Disponível em: https://www.ana.gov.br/sar/outros-sistemas-hidricos/cantareira. Acesso em: 19 jun. 2026.

AGÊNCIA PAULISTA DE ÁGUAS, SP-ÁGUAS. *Sistema de Suporte à Decisão para Gestão de Recursos Hídricos – Mananciais*. Disponível em: https://cth.daee.sp.gov.br/ssdsp/Mananciais. Acesso em: 19 jun. 2026.

TERCINI, J. R. B; MELLO JÚNIOR, A. V. Impact of Hydroclimatic Changes on Water Security in the Cantareira Water Production System, Brazil. *Atmosphere*, v. 14, n. 12, p. 1836, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/atmos14121836.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. SMAP – A Simplified Hydrological Model. In: SINGH, V. P. (ed.). *Applied Modelling in Catchment Hydrology*. Littleton, CO: Water Resources Publications, 1982.

ZUFFO, A.C.; DUARTE, S.N.; JACOMAZZI, M.A.; CUCIO, M.S.; GALBETTI, M.V. The Cantareira System, the Largest South American Water Supply System: Management History, Water Crisis, and Learning. Hydrology, 2023

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à SP-ÁGUAS, a Sala de Situação PCJ, ao Departamento de Hidráulica e Engenharia Ambiental da Universidade de São Paulo e ao consórcio HCC3.