

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

APLICAÇÃO DE MODELAGEM HIDROLÓGICA SUB-HORÁRIA: ESTUDO NA BACIA DO RESERVATÓRIO PAIVA CASTRO, SÃO PAULO

*Dário Hachisu Hossoda¹ ; Cristiano Pádua Milagres de Oliveira² ; Alexandre Nunes Roberto³ ;
Carla Voltarelli Franco da Silva⁴ ; Pedro Ludovico Bozzini⁵ ; Joaquin Ignacio Bonnecarrère
Garcia⁶ & Rafael Miranda⁷*

Abstract: This study presents the application of the PLASH hydrological model to simulate the Paiva Castro reservoir basin, located in the Metropolitan Region of São Paulo, using a 10-minute temporal resolution. The objective was to evaluate the model's performance through an integrated simulation approach, representing the entire drainage area as a single system. Calibration was performed using accumulated runoff volumes as the objective function, aiming to accurately capture the basin's hydrological behavior over time. The results showed that PLASH performed well. The model was able to effectively reproduce the main hydrological processes of the basin, even with a simplified structure and high temporal resolution. The integrated simulation with 10-minute intervals proved to be effective in understanding the system's dynamics and reinforced the model's potential as a practical tool for water resources management and reservoir operation.

Keywords – Hydrological Modeling, Sub-Hourly Simulation, Rainfall-Runoff model

Resumo: Este trabalho apresenta a aplicação do modelo hidrológico PLASH na simulação da bacia do reservatório Paiva Castro, localizada na Região Metropolitana de São Paulo, com resolução temporal de 10 minutos. O objetivo foi avaliar o desempenho do modelo por meio de uma abordagem integrada, considerando toda a área de drenagem como um único sistema. A calibração foi realizada utilizando os volumes acumulados de escoamento como função objetivo, buscando representar com maior precisão o comportamento hidrológico da bacia ao longo do tempo. Os resultados indicaram um bom desempenho do PLASH. O modelo foi capaz de reproduzir adequadamente os principais processos hidrológicos da bacia, mesmo com uma estrutura simplificada e alta resolução temporal. A simulação integrada em intervalos de 10 minutos mostrou-se eficaz para a compreensão da dinâmica do sistema e reforçou o potencial do modelo como ferramenta prática para a gestão de recursos hídricos e operação de reservatórios.

Palavras-Chave – Modelagem Hidrológica; Simulação Sub-Horária; Modelo Chuva-Vazão

1) Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH), Av. Diógenes Ribeiro de Lima, 481 – dario.hossoda@fcth.br, (11) 3091-5549

2) Laboratório de Sistemas de Suporte à Decisões (LabSid), Av. Prof. Almeida Prado, 83 – cristiano@labsid.eng.br, (11) 3091-5549

3) Laboratório de Sistemas de Suporte à Decisões (LabSid), Av. Prof. Almeida Prado, 83 – alexandre@labsid.eng.br, (11) 3091-5549

4) Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH), Av. Diógenes Ribeiro de Lima, 481 – carla.voltarelli@fcth.br, (11) 3091-5549

5) Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH), Av. Diógenes Ribeiro de Lima, 481 – pedro.ludovico@fcth.br, (11) 3091-5549

6) Universidade de São Paulo (USP), Av. Prof. Almeida Prado, 83 – joaquinbonne@usp.br, (11) 3091-5549

7) Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), Estr. Municipal Dr. Sarkis Tellian, km 20, Sta Inês, Mairiporã/SP.
raffmiranda@sabesp.com.br, (11) 2450-4208

INTRODUÇÃO

Modelos hidrológicos são ferramentas fundamentais para a análise de processos na hidrologia e previsão do comportamento de sistemas. Modelos de vazão são formados por conjuntos de equações que a calculam com base em uma série de parâmetros que refletem as características da bacia em estudo (Sahu et al., 2023). Esses modelos são utilizados para estudar diferentes cenários, inclusive extremos, como períodos prolongados de estiagem e cheias. Eles são geralmente classificados em três categorias: modelos caixa-preta, de difícil interpretação, mas fáceis de ajustar; modelos físicos, baseados em leis e equações da resposta hidrológica real, porém mais custosos computacionalmente; e modelos conceituais, que utilizam equações simplificadas para representar o armazenamento de água na bacia e são relativamente simples de aplicar (Sitterson et al., 2017). Segundo Becker (2023), modelos simplificados ajudam a poupar tempo e recursos, sendo, portanto, ferramentas úteis tanto para o planejamento quanto para a operação.

O Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP) é um modelo chuva-vazão proposto por Lopes et al (1982) originalmente no formato diário e posteriormente adaptado para as versões mensal e horária, sendo um exemplo de modelo conceitual (De Paiva et al., 2020), formado por reservatórios matemáticos para representar as características da bacia, conhecidas como variáveis de estado. Sendo uma ferramenta valiosa para o planejamento dos recursos hídricos.

Diversos estudos também utilizaram o método de Muskingum para considerar o efeito de armazenamento dentro do canal e amortecimento da onda de cheia associados à modelos hidrológicos chuva-vazão, como Hossoda et al. (2024) e Bozzini et al. (2023), obtendo resultados satisfatórios ao analisar vazões no exutório das bacias à jusante. Já os métodos de Clark e de Green-Ampt são frequentemente utilizados no ramo da hidrologia sendo utilizados de forma isolada ou em conjunto com outros modelos. O método de Clark usa o conceito de hidrogramas unitários instantâneos para realizar o translado do excedente de chuva para o exutório da bacia enquanto o método de Green-Ampt é a aplicação da Lei de Darcy, considerando um solo homogêneo com um teor inicial de água e carga constantes (USACE, 2000).

O modelo hidrológico PLASH, proposto por Oliveira (2012), tem o objetivo de integrar os dados resultantes de monitoramento aos modelos hidrológicos, que permitem o cálculo de vazão para diferentes sub-bacias e assim dar suporte à gestão de recursos hídricos. O modelo foi baseado na versão horária do modelo SMAP, sendo um modelo conceitual com reservatórios lineares para a representação de fenômenos físicos que ocorrem na bacia, além de funções do acoplamento de modelos como os métodos Clark, para a transformação da precipitação em escoamento, Muskingum para consideração do armazenamento e translado da onda de cheia no rio ou canal e o método de Green-Ampt para representar a infiltração da água no solo.

Este trabalho apresenta a aplicação do modelo PLASH para simulação hidrológica de bacias na Região Metropolitana de São Paulo com resolução temporal de 10 minutos, utilizando dados históricos e simulando eventos de chuva com horizonte de previsão de seis horas.

METODOLOGIA

A região de estudo apresentado pela Figura 1 é a bacia do reservatório Paiva Castro, a qual é parte integrante do Sistema Cantareira, que abastece a Região Metropolitana de São Paulo. Este reservatório caracteriza-se como o último reservatório do sistema derivações por gravidade, sendo formado de um barramento no rio Juqueri no município de Franco da Rocha e contando com a recepção de água proveniente dos demais reservatórios, sendo contido predominantemente no município de Mairiporã e situado à jusante da área urbanizada do município (Giatti, 2000).

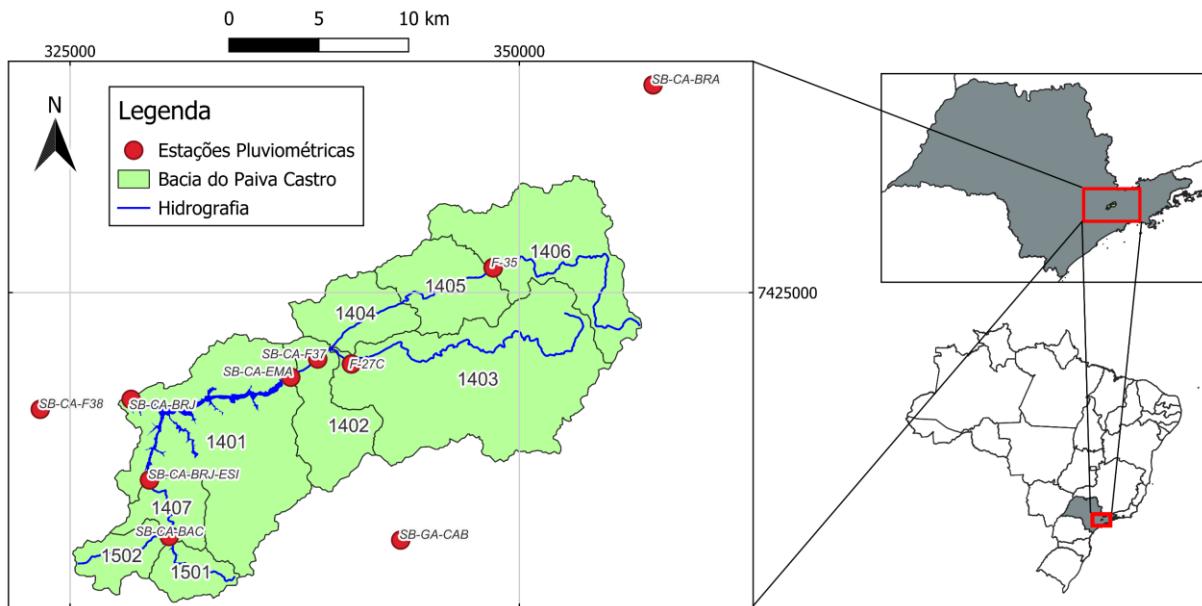


Figura 1 – Região de Estudo. Fonte: ANA, Sabesp e IBGE

Os dados hidrológicos utilizados são provenientes do sistema de suporte a decisões da Sabesp (SSD Sabesp), iniciado em 1998 para poucos usuários e posteriormente modernizado para permitir a utilização de mais usuários (Fumes et al., 2011). Atualmente o SSD Sabesp ainda recebe atualizações, sendo amplamente utilizado.

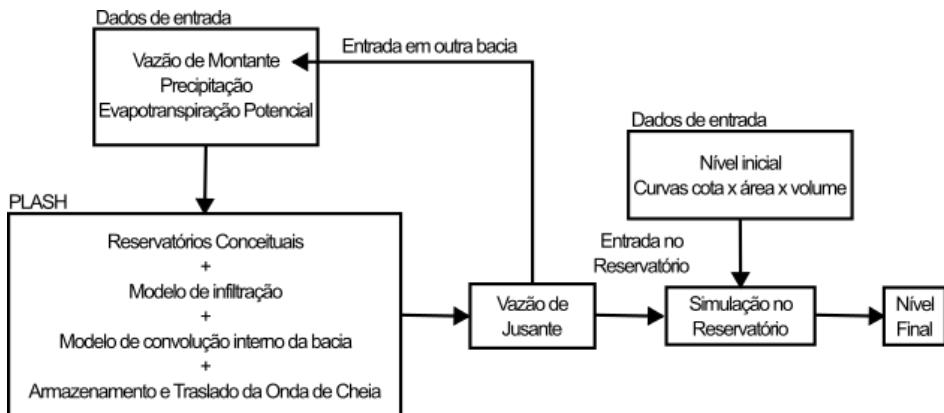


Figura 2 – Fluxograma da modelagem.

A Figura 2 apresenta o fluxograma geral da modelagem, contendo os principais dados de entrada e os modelos relacionados. O PLASH é responsável pela conversão chuva-vazão, servindo de entrada para o modelo de simulação no reservatório ou entrando novamente como dado de entrada para o translado da onda de cheia no rio em caso de haver uma outra sub-bacia e não um reservatório. Além da lógica de propagação de vazões e conversão chuva-vazão, para que o sistema fosse representativo, também foi necessário considerar as transposições dentro da região de estudo, compostas pela Estação Elevatória de Santa Inês (ESI), a operação do Túnel 5 da Sabesp (T5) e a vazão descarregada do sistema Águas Claras para a Estação de Tratamento de Água (ETA) Guaraú.

As vazões de transferência foram consideradas de acordo com sua localização, sendo que o T5 tem influência na bacia 1405, a ESI nas bacias 1401 e 1501 e a ETA Guaraú na bacia 1501.

Para calibrar o modelo hidrológico, foi utilizada como função objetivo (FO) a somatória da diferença quadrática entre os valores calculados e os valores provenientes de monitoramento. Por conta da diferença entre os dados de vazão calculados e observados foi utilizada a curva S resultante para comparação, dado que a calibração teve como objetivo simular o comportamento do reservatório. O otimizador utilizado foi o *Solver* do Excel, configurado para minimizar a FO dada por:

$$FO = \sum_{i=1}^n (y_{obs_i} - y_{calc_i})^2$$

Onde y_{obs} são valores observados e y_{calc} valores calculados, para cada valor (i) de um total de n dados.

RESULTADOS

Utilizou-se o evento histórico de cheia de março de 2016, mais especificamente o período de 01/03/2016 a 31/03/2016. A estratégia de calibração das bacias consistiu na otimização individual de cada sub-bacia de montante para jusante, uma vez que a vazão resultante destas bacias foi utilizada como dado de entrada na bacia imediatamente à jusante. Devido às características semelhantes e à proximidade geográfica, os parâmetros calibrados apresentaram valores próximos entre si.

Possuindo 22 possíveis variáveis de calibração consideradas por sub-bacia, que podem ser agrupadas pelos fenômenos que representam (ambiente), a Tabela 1 apresenta os valores mínimo e máximo para todas as bacias.

Tabela 1 – Variáveis calibradas.

Variável	Ambiente	Mínimo	Máximo	Variável	Ambiente	Mínimo	Máximo
D_{INC}	INC	1,000	1,079	SS	FT	300,534	360,691
$R_{INC}(0)$	INC	0,500	0,500	CC	FT	0,8	0,8
$D_{P,int}$	INT	1,189	4,608	CR	FT	0,4999	0,4999
$R_{P,int}(0)$	INT	0,099	0,100	$R_{sol}(0)$	SOL	0,056	0,058
$D_{P,sup}$	SUP	1,173	2,056	K_{sub}	SUB	19,695	31,424
$R_{P,sup}(0)$	SUP	5,957	9,031	$R_{sub}(0)$	SUB	77,225	105,225
$CHS_{P,ss}$	SS	9,347	13,043	TC	CLARK	0,099	0,108
$PMS_{P,ss}$	SS	0,820	0,854	TA	CLARK	18,415	23,880
$PE_{P,ss}$	SS	0,1	0,1	FP	MUSK	0,35	0,48
$IA_{P,ss}(0)$	SS	25,51	29,33	CA	MUSK	0,2	0,5
K_{sup}	SUP	0,001	0,009	NT	MUSK	1,00	1,04

É apresentada a descrição das variáveis do modelo PLASH, organizadas por ambiente hidrológico. Em INC (área impermeável não conectada), DINC representa o armazenamento máximo em depressões e $R_{INC}(0)$ o armazenamento inicial. Em INT (interceptação), $D_{P,int}$ é a interceptação máxima e $R_{P,int}(0)$ o armazenamento inicial. No ambiente SUP (superfície), $D_{P,sup}$ refere-se ao armazenamento máximo em depressões, $R_{P,sup}(0)$ ao armazenamento inicial e K_{sup} à constante de

recessão do escoamento superficial. No ambiente SS (sub-superficial), têm-se $CHS_{P,ss}$ (condutividade hidráulica saturada), $PMS_{P,ss}$ (fator de sucção capilar), $PE_{P,ss}$ (porosidade do solo) e $IA_{P,ss}(0)$ (umidade inicial). O ambiente FT (funções de transferência) compreende SS (capacidade de saturação do solo), CC (capacidade de campo) e CR (capacidade de recarga subterrânea). Em SOL (solo), $R_{sol}(0)$ é o armazenamento inicial do reservatório do solo. Já em SUB (subsolo), K_{sub} representa a constante de recessão do escoamento subterrâneo e $R_{sub}(0)$ o armazenamento inicial do respectivo reservatório. No componente de transformação hidrológica, o método CLARK inclui TC (tempo de concentração) e TA (tempo de ascensão). Por fim, o método MUSK (Muskingum) é representado por FP (parâmetro de tempo de deslocamento da onda), CA (fator de ponderação entre vazões de entrada e saída) e NT (número de trechos de propagação).

Tabela 2 – Valores performance da calibração.

Bacia	Hidrograma		Curva S	
	Incremental	Acumulado	Incremental	Acumulado
1401	1,64	1,99	8.100	111.615
1402	1,62	4,41	8.963	86.120
1403	2,02	2,02	4.960	4.960
1404	1,86	3,93	5.237	35.845
1405	2,03	4,93	4.963	34.137
1406	2,07	2,07	5.006	5.006
1407	1,90	1,90	5.088	5.088
1501	2,00	2,00	4.956	4.956
1502	2,58	2,58	6.272	6.272

A Tabela 2 apresenta os valores de performance da calibração obtidos com base na função objetivo, considerando dois tipos de análise: o hidrograma, que avalia a série temporal das vazões, e a curva S, que representa o volume acumulado ao longo do evento. Os resultados estão organizados em valores incrementais, que se referem exclusivamente ao desempenho da bacia individual, e acumulados, que consideram também a contribuição das bacias a montante, conforme a topologia apresentada na Figura 1.

Observa-se que os valores associados à curva S acumulada são mais elevados, o que é esperado, dado que refletem volumes totais maiores ao longo do sistema. O bom ajuste da calibração pode ser visto através da Figura 3, que apresenta a curva S na entrada do reservatório de Paiva Castro, em que se pode notar que houve uma boa aproximação das curvas observada ($S_{j,obs}$) e calculada ($S_{j,calc}$) dos valores incrementais.

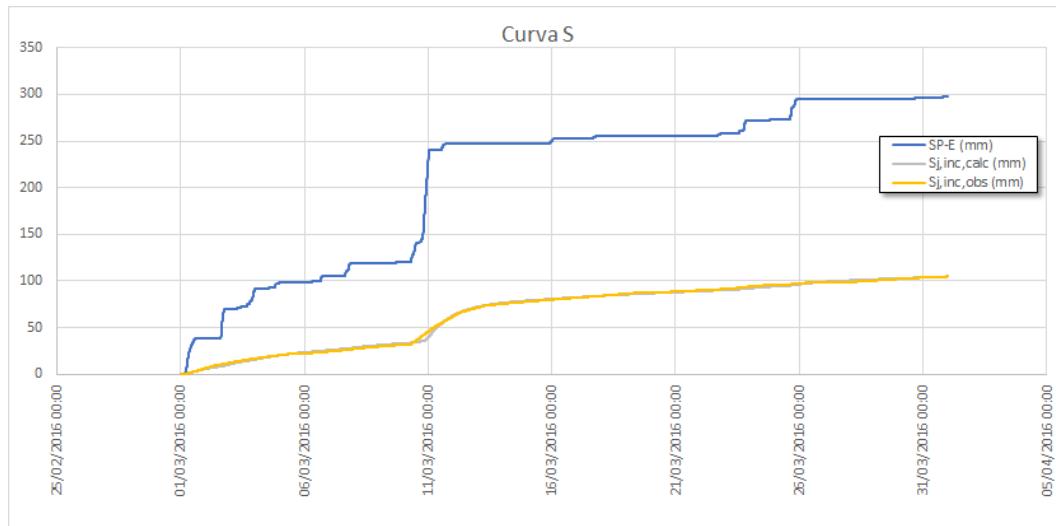


Figura 3 – Curva S da calibração no reservatório de Paiva Castro

A análise dos resultados também pode ser feita de maneira gráfica, observando-se o hidrograma resultante. Na Figura 4 é possível notar que o valor da vazão acumulada ($Q_{j,acum,calc}$) na cor cinza se aproxima de maneira satisfatória do valor de vazão acumulada observada ($Q_{j,acum,obs}$) em amarelo, além disso é possível ver no gráfico o hietograma (chuva) e a vazão de montante, que também é computada no modelo como dado de entrada. A somatória da diferença quadrática dos hidrogramas de vazão observada e calculada resultaram em um valor de 1,987.

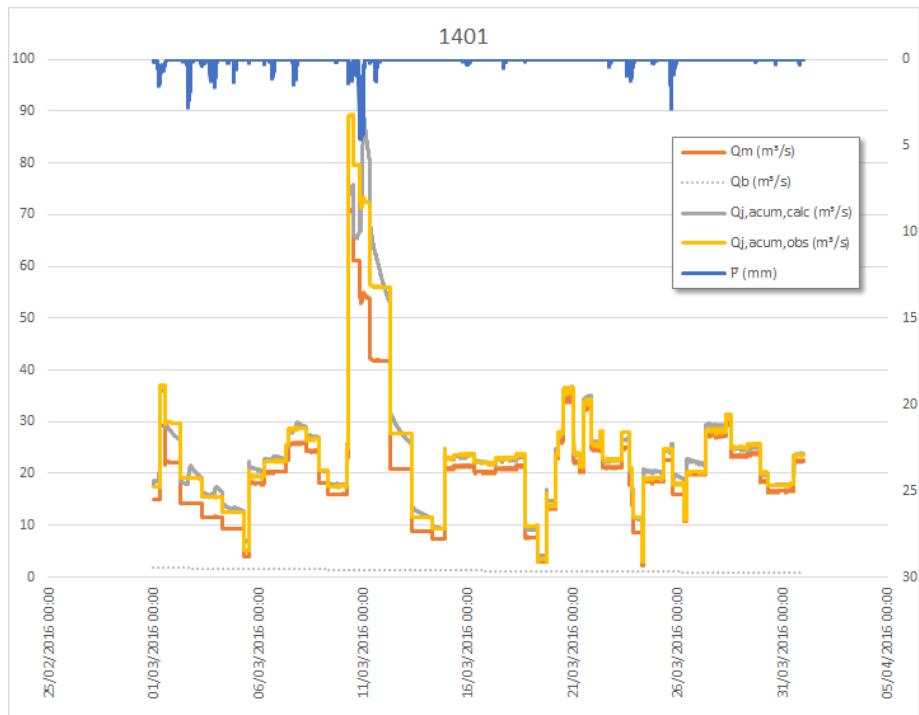


Figura 4 – Hidrograma de entrada no reservatório Paiva Castro

Para a utilização do modelo é necessário fornecer valores estimados para a operação e condições iniciais do modelo, que podem ser encontradas em uma aba dedicada para a operação, apresentada pela Figura 5.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Data e hora inicial	30/01/2022 00:00								
2	Δt (hh:mm)	0:10								
3	Δt (d)	0.007								
Manobras de operação (m³/s)										
5	Níveis iniciais (m)*									
6	PCH Cascata	765.00								
7	Paiva Castro	744.55								
8	Águas Claras	859.41								
9	*no início do período observado, se não tiver dados históricos									
11	Capacidades máximas (m ³ /s)									
12	Túnel 5	35.00								
13	ESI	33.00								
14	ETA Guaraú	33.00								

Figura 5 – Planilha de condições de simulação.

A Figura 6 apresenta o gráfico com a simulação para 6 horas adiante. Neste exemplo, foi simulado a data do dia 30/01/2022 a partir das 0:00 h. O modelo então utiliza o período das 24 h que antecedem essa data para realizar o aquecimento do modelo e verificação deste histórico pelo usuário. Além dos resultados de nível e vazão, também são apresentados os níveis de referência operacional, correspondente à 30% do nível total, o nível de alerta em que medidas de contingência são tomadas, e nível máximo operacional.

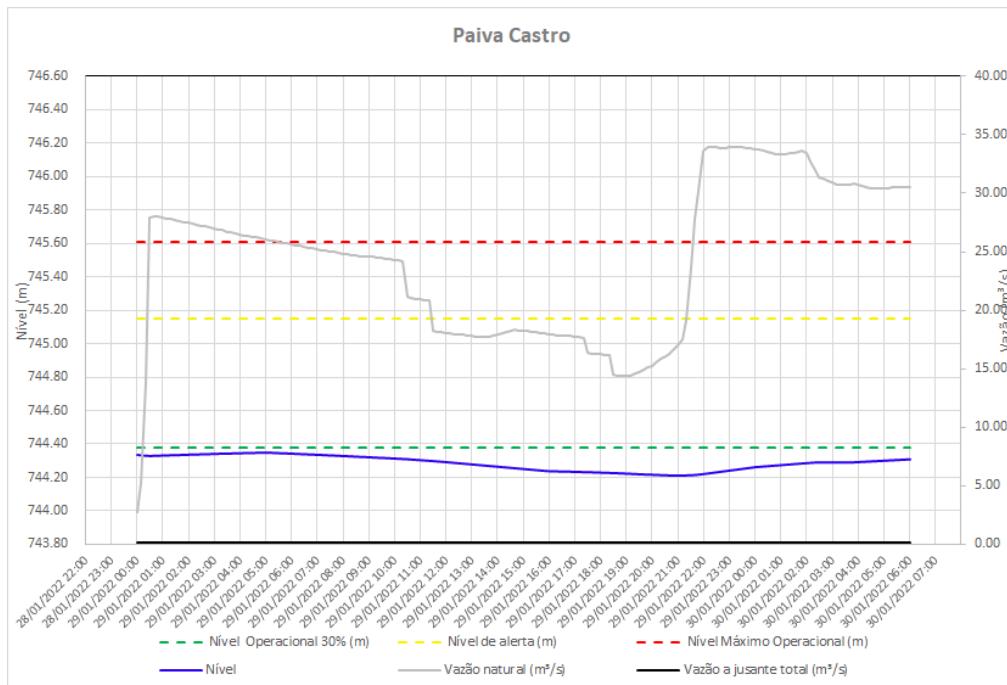


Figura 6 – Resultados de nível e vazão no reservatório Paiva Castro.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a aplicação do modelo hidrológico PLASH em escala sub-horária para simulação de vazões na bacia do reservatório Paiva Castro, por meio de planilhas eletrônicas. Foi realizada a integração entre diferentes sub-bacias e reservatórios da região de estudo.

Devido à alta resolução temporal dos dados e à limitação de observações para verificação, a calibração foi conduzida com base na otimização dos volumes acumulados, utilizando o Solver do Excel. A função objetivo, definida como a soma da diferença quadrática entre os valores simulados e observados, apresentou resultados satisfatórios. Ainda assim, destaca-se a necessidade de realizar a validação do modelo com um período distinto do utilizado na calibração.

Apesar das limitações, o modelo demonstrou capacidade de representar de forma integrada o comportamento hidrológico da bacia com resolução temporal de 10 minutos, fornecendo informações relevantes para operadores e pesquisadores no monitoramento e operação do reservatório Paiva Castro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH), à Universidade de São Paulo (USP), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade de São Paulo (PPGEC-USP) e à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) pelo apoio institucional e disponibilização de dados.

REFERÊNCIAS

- BECKER, Ana Carolina Canossa *et al.* Zero-dimensional modelling as tool for reservoir water quality planning and management. **RBRH**, v. 28, p. e4, 14 abr. 2023.
- BOZZINI, Pedro Ludovico *et al.* SHOP - Modelo de Simulação Hidrológica e Operacional Baseada em Previsões. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. **XXV SBRH**. 2023.
- DE PAIVA, Luana Ferreira Gomes *et al.* Prediction of monthly flows for Três Marias reservoir (São Francisco river basin) using the CFS climate forecast model. **RBRH**, v. 25, p. e16, 17 abr. 2020.
- FUMES, Nilzo Renê *et al.* SISTEMA DE SUPORTE A DECISÕES DA SABESP. In: 2011.
- GIATTI, Leandro Luiz. **Reservatório Paiva Castro - Mairiporã - SP: avaliação da qualidade da água sobre alguns parâmetros físicos, químicos e biológicos (1987/1998)**. Dissertação de Mestrado—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2000.
- HOSSODA, Dário Hachisu *et al.* Integrated modeling of quality and quantity for water resources management: case study in the Upper Paranapanema Basin. **RBRH**, v. 29, p. e21, 12 ago. 2024.
- LOPES, J. E. G. *et al.* SMAP—a simplified hydrological model. **Water Resources Publications, Littleton, Colorado**, p. 167–176, 1982.
- OLIVEIRA, Cristiano de Pádua Milagres. **Plataforma de análise e simulação hidrológica - PLASH**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 17 out. 2012.

SAHU, Mukul Kumar *et al.* State-of-the-art hydrological models and application of the HEC-HMS model: a review. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 9, n. 3, p. 3029–3051, 1 set. 2023.

SITTERSON, J. *et al.* **An Overview of Rainfall-Runoff Model Types.** [S.l.]: United States Environmental Protection Agency, 2017. Disponível em: <https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=339328&Lab=NERL>. Acesso em: 9 jun. 2025.

USACE. **HEC-HMS Hydrologic Modeling System, Technical Reference Manual.** Hydrologic Engineering Center, , 2000. Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/transform/clark-unit-hydrograph-model>>. Acesso em: 9 jun. 2025