

Equifinalidade na modelagem hidrológica com o HYMOD: estudo de caso na bacia do rio Aricanduva

Greicelene Jesus da Silva¹; Maria Clara Fava¹; Anai Floriano Vasconcelos¹; Marcos Roberto Benso²; Marina Batalini de Macedo³; Maria Elisa Leite Costa⁴; Alan Vaz Lopes⁴; Beliana Cavalcante Sawada de Carvalho⁵; Mauricio Jonas Ferreira⁶; Javier Tomasella⁷

RESUMO – A modelagem chuva-vazão é fundamental para compreender a dinâmica hidrológica e prever eventos extremos, especialmente em bacias urbanizadas. Este estudo avaliou o desempenho do modelo conceitual HYMOD na simulação de eventos hidrológicos em uma sub-bacia do rio Aricanduva, em São Paulo. A calibração foi estruturada em três etapas, visando investigar a sensibilidade e a compensação entre parâmetros, sendo o desempenho avaliado pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE). Os resultados indicaram bom desempenho na calibração (NSE médio de 0,93). Contudo, diferentes combinações paramétricas produziram desempenhos semelhantes, evidenciando equifinalidade e limitações na identificabilidade dos parâmetros. Observou-se também compensação entre parâmetros como α , K_s e β , refletindo ajustes internos do modelo. Conclui-se que, embora o HYMOD apresente bom desempenho global, sua aplicação em bacias urbanas requer cautela, sendo recomendada a adoção de estratégias de calibração mais robustas, capazes de considerar limitações estruturais do modelo e reduzir efeitos de compensação paramétrica, de modo a melhorar a representatividade dos processos hidrológicos.

Palavras-Chave – Simulação hidrológica, modelo chuva-vazão, previsão de vazão.

ABSTRACT – Rainfall-runoff modeling is essential for understanding hydrological dynamics and predicting extreme events, particularly in urbanized catchments. This study evaluated the performance of the conceptual hydrological model HYMOD in simulating hydrological events in a sub-basin of the Aricanduva River, located in São Paulo, Brazil. The calibration was structured into three stages to investigate parameter sensitivity and internal compensation, with model performance assessed using the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient. The results indicated satisfactory performance during calibration (mean NSE = 0.93). However, different parameter combinations produced similar performance, evidencing equifinality and limitations in parameter identifiability. Parameter compensation was also observed, particularly among α , K_s , and β , reflecting internal model adjustments. It is concluded that, although HYMOD shows good overall performance, its application in urban catchments requires caution. The adoption of more robust calibration strategies is recommended to account for structural model limitations and reduce parameter compensation effects, thereby improving the representation of hydrological processes.

Key-words – Hydrological simulation, rainfall-runoff model, streamflow forecasting.

1) Universidade Federal de São Carlos; gjsilva@ufscar.br; mcfava@ufscar.br; anai.vasconcelos@ufscar.br

2) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo; marcosbenso@usp.br

3) Universidade Federal de Itajubá; marinamacedo@unifei.edu.br

4) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico; maria.costa@ana.gov.br; alanvazlopes@gmail.com

5) Universidade Estadual Paulista; beliana.sawada@unesp.br

6) Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo; mjferradura@hotmail.com

7) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; javier.tomasella@inpe.br

1. Introdução

As cidades estão cada vez mais vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas, especialmente a secas e inundações, que afetam milhões de pessoas todos os anos, sobretudo as mais vulneráveis. Entre 1950 e 2020, a população urbana brasileira cresceu de 36% para 87% por cento. Em especial, a população da região metropolitana de São Paulo (RMSP) experienciou um crescimento de aproximadamente 11 vezes (IBGE, 2022). Essa rápida urbanização, especialmente em grandes cidades, pode alterar a formação, intensidade, trajetória e duração de eventos de precipitação (Song et al., 2021).

Estudos indicam que mudanças climáticas e de uso do solo têm intensificado a frequência e a severidade de eventos hidrológicos extremos, alterando a dinâmica do escoamento e interferindo no ciclo hidrológico. No Brasil, entre 1995 e 2019, os desastres naturais causaram prejuízos de cerca de 81 bilhões de dólares, sendo que apenas eventos climáticos extremos — como enxurradas, inundações e chuvas intensas — responderam por aproximadamente 25 bilhões de dólares em danos, distribuídos em mais de 10 mil ocorrências, com média anual de 1,04 bilhão de dólares, representando 31% das perdas totais no período (UNISDR, 2015; CEPED 2020; FERREIRA E ROCHA, 2025).

A RMSP apresenta frequentes eventos de inundação com significativos prejuízos à população. Como exemplo, em Ferreira e Rocha (2025) estudaram o impacto de inundação de fevereiro de 2019 (considerada de alto impacto) na bacia do rio Aricanduva, situada na zona leste de São Paulo. Os resultados indicaram que estruturas de diferentes tipologias foram atingidas, gerando um prejuízo econômico direto total estimado em US\$ 376.040,00.

Com vistas à investigação científica do comportamento da vazão e à predição de eventos extremos, de forma a evitar ou mitigar prejuízos e perdas humanas, modelos de conversão chuva-vazão (CV) são amplamente utilizados para a extrapolação de vazões no tempo e no espaço. Esses modelos permitem simular respostas hidrológicas em bacias com pouco ou nenhum monitoramento de vazão (Wagener e Wheeler, 2006), realidade comum no contexto brasileiro.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo aplicar o modelo conceitual simplificado HYMOD na bacia do rio Aricanduva, uma região frequentemente impactada por eventos extremos de inundação. Considerando que o HYMOD não representa explicitamente os reservatórios físicos de retenção existentes na bacia, a calibração foi estruturada em três etapas, com o intuito de investigar a ocorrência de compensações internas entre parâmetros e seus efeitos na resposta hidrológica simulada. Busca-se, assim, avaliar a presença de equifinalidade, isto é, a capacidade de diferentes combinações paramétricas produzirem hidrogramas semelhantes, ainda que representando processos internos distintos.

2. Metodologia

2.1 Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Aricanduva localiza-se na zona leste do município de São Paulo, abrangendo aproximadamente 103,9 km², o que corresponde a cerca de 6,8% da área total municipal. O rio Aricanduva é um afluente da margem esquerda do rio Tietê, com nascente situada na divisa entre os municípios de São Paulo, Mauá e Ferraz de Vasconcelos, e escoamento predominante no sentido sudeste–noroeste até sua foz. A rede hidrográfica da bacia é composta por diversos tributários, destacando-se, na margem esquerda, os córregos Caguaçu, Inhumas, Tapera, Taboão, Taubaté e Rapadura, e, na margem direita, os córregos Carrão, Rincão, Pelegrino e Coutinho. Essa configuração confere à bacia uma drenagem densa e altamente ramificada, característica de áreas urbanizadas (FCTH, 2022).

Inserida em contexto urbano consolidado, a bacia apresenta elevado grau de impermeabilização do solo e intensa ocupação territorial, fatores que contribuem para a geração de escoamento superficial significativo e recorrência de eventos de inundação. Como resposta a essa dinâmica hidrológica, a bacia conta com infraestrutura de controle de cheias composta por reservatórios de retenção e polderes, implantados principalmente no âmbito do Plano Diretor de Macrodrenagem do Alto Tietê. Dessa forma, a bacia do rio Aricanduva configura-se como um sistema hidrográfico urbano complexo, no qual a interação entre processos hidrológicos e a ocupação antrópica demanda estratégias integradas de planejamento e gestão para mitigação de riscos hidrológicos e promoção da sustentabilidade urbana (FCTH, 2022).

Como o objetivo do trabalho foi a conversão de chuva a vazão para servir como entrada de um modelo hidráulico de propagação de vazão, o HYMOD foi aplicado para simulação de vazão à montante da região do Aricanduva Shopping, Figura 1.

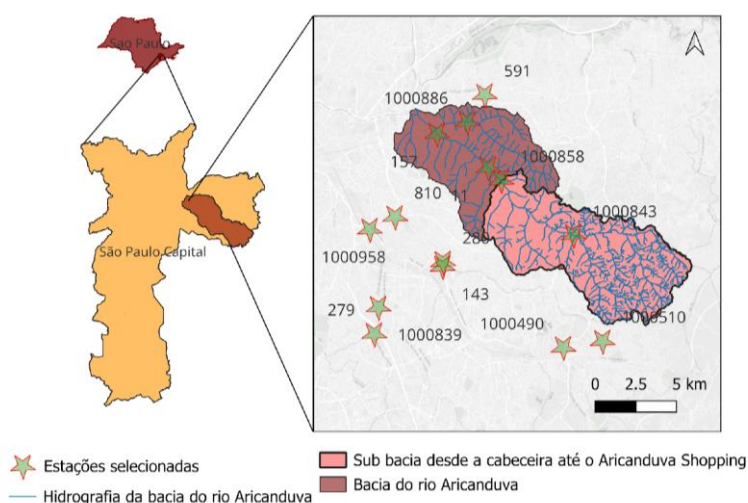


Figura 1 – Área de estudo. Fonte: Autores

2.2 Descrição do modelo hidrológico HYMOD

O modelo hidrológico utilizado, denominado HYMOD, é um modelo conceitual simplificado, baseado nas características de produção de vazão em um ponto dentro da bacia. Nesse modelo, a variação espacial dos elementos de armazenamento e escoamento superficial do ciclo hidrológico dentro de uma bacia é representada por uma distribuição de probabilidade derivada de uma expressão algébrica introduzida por Moore (1985). Wagener et al (2001) introduziram um framework de aplicação do modelo, cuja representação e parâmetros de calibração estão representados na Figura 2. Os cinco parâmetros deste modelo são: a capacidade máxima de armazenamento na bacia hidrográfica (C_{max}); o grau de variabilidade espacial da capacidade de retenção de umidade do solo dentro da bacia hidrográfica (β); o fator de distribuição do fluxo entre as duas séries de reservatórios (α); e os tempos de residência dos reservatórios lineares (K_q – fluxo rápido) e (K_s – fluxo lento).

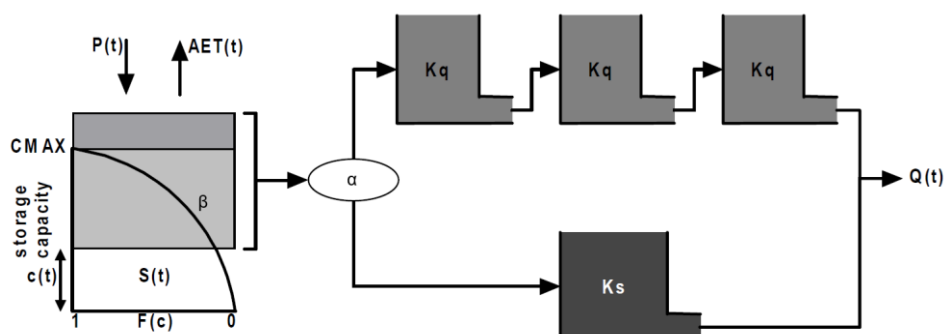


Figura 2 – Representação do HYMOD.

Fonte: Modificado de Wagener et al (2001)

2.3 Dados de entrada e procedimento de calibração e validação

A modelagem hidrológica foi conduzida a partir da utilização do modelo conceitual HYMOD, aplicado à bacia de estudo com base em dados hidrometeorológicos observados. Foram utilizados dados de precipitação e vazão com resolução temporal de 10 minutos, provenientes do Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo (SAISP). Os dados pluviométricos foram espacialmente interpolados para a bacia por meio do método do *Inverse Distance Weighting* (IDW), com potencial de 2, considerando um buffer de 15 km ao redor dos limites da bacia, de modo a incorporar 13 estações pluviométricas adjacentes potencialmente influentes.

Para a definição dos períodos de simulação, 10 eventos hidrológicos foram previamente identificados e classificados em três categorias de intensidade (fraca, média e forte), com base em métricas representativas como a mediana da vazão observada. A seleção dos eventos foi realizada de forma aleatória dentro de cada classe de intensidade, garantindo a representatividade das diferentes condições hidrológicas. Uma descrição mais detalhada dos eventos encontra-se na Tabela 2.

Do conjunto total de eventos identificados, 50% (cinco eventos) foram destinados à etapa de calibração do modelo, enquanto os demais foram reservados para validação. Conforme procedimento metodológico adotado, cada evento de calibração foi precedido e sucedido por um período de aquecimento (*warm-up*) de 24 horas, com o objetivo de minimizar a influência das condições iniciais do modelo. Devido à descontinuidade temporal entre os eventos selecionados, as séries foram concatenadas e ajustadas para uma escala temporal contínua, utilizando datas fictícias, permitindo a execução sequencial das simulações. A calibração dos parâmetros do modelo foi realizada por meio da maximização do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), calculado a partir da comparação entre as vazões simuladas e observadas.

Dado que, por ser um modelo simplificado sem representação dos reservatórios de detenção existentes na bacia, além de melhor representar o comportamento de áreas urbanas, o modelo pode produzir resultados de calibração que resolvem a falta de representatividade realizando uma compensação interna entre os parâmetros do modelo. Dessa forma, a calibração foi dividida em três etapas. Inicialmente, os parâmetros do modelo foram restringidos a valores plausíveis para bacias urbanas, mas com uma gama maior de possíveis valores de K_q e K_s (ainda que seja esperado predomínio do fluxo rápido em detrimento do lento), com $K_q > K_s$ e $0,4 < \alpha < 0,99$. Na segunda etapa, o fluxo rápido é forçado para valores mais altos de K_q e α , bem como menores de K_s . Na terceira etapa, o α é fixado em um valor alto enquanto que os outros parâmetros ficam livres com o objetivo de captar a compensação entre os demais parâmetros do modelo. Os intervalos dos parâmetros em cada etapa, bem com suas unidades estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Restrições dos parâmetros nas diferentes fases de calibração.

Etapas de calibração	Restrições dos Parâmetros				
	C_{max} (mm)	β (unidimensional)	α (unidimensional)	$K_s (\Delta t^{-1})^*$	$K_q (\Delta t^{-1})$
Calibração 1	1 – 500	0,1 – 5,0	0,4 – 0,99	0,001 – 0,05	0,05 – 0,5
Calibração 2	1 – 500	0,1 – 5,0	0,6 – 0,99	0,001 – 0,02	0,1 – 0,5
Calibração 3	1 – 500	0,1 – 5,0	0,7	0,001 – 0,05	0,05 – 0,5

* $\Delta t^{-1} = 10 \text{ min.}$

A validação consistiu na aplicação dos parâmetros calibrados aos eventos independentes, possibilitando a avaliação da capacidade preditiva do modelo sob diferentes condições hidrológicas. Uma vez que o evento 9 possuía dados faltantes durante a recessão do pico e período de *warmup* no pós-evento, o modelo foi ajustado para o cálculo do NSE mesmo em condição de dados faltantes de vazão. Essa alteração não atrapalha a qualidade do ajuste significativamente, uma vez que não há dados faltantes durante o pico de inundação.

3. Resultados e discussão

Na Tabela 2, encontram-se os resultados de NSE e os parâmetros das calibrações e da validação do HYMOD, bem como a descrição e classificação dos eventos. O NSE global das etapas de calibração, de 0,90-0,93, indica inicialmente que o modelo no geral apresentou excelente ajuste aos dados dos eventos de calibração e períodos de *warmup*. As vazões observadas bem como as simuladas nas etapas de calibração dos eventos estão expostas nas Figuras 3. O desempenho das etapas de calibração foi similar para as três etapas de calibração, entretanto na validação observa-se uma queda no desempenho do modelo, principalmente para os eventos 2, 7 e 10, indicando *overfitting*,

Com relação à variação dos parâmetros de calibração entre as etapas, observa-se que, na Etapa 1, na qual os parâmetros apresentavam maior liberdade de ajuste devido ao intervalo mais amplo de busca, houve predominância do escoamento lento, com aproximadamente 60% da vazão total sendo direcionada a esse componente, além de tempos de resposta semelhantes entre os reservatórios rápido e lento. Tal configuração mostra-se pouco representativa para bacias urbanas, nas quais se espera a predominância e menor tempo atribuído ao escoamento rápido em função da elevada impermeabilização superficial.

Na Etapa 2, ao impor a predominância dos parâmetros associados ao escoamento rápido em relação ao lento, o modelo passou a estimar cerca de 60% da vazão direcionada ao fluxo rápido, acompanhado por uma redução no parâmetro de resposta relacionado ao tempo de resposta no reservatório lento. Esse comportamento é mais condizente com a dinâmica hidrológica esperada para a área de estudo. No entanto, para manter níveis elevados de desempenho, o modelo elevou o

parâmetro β , associado à variabilidade espacial da saturação do solo a valores máximos, indicando aumento na geração de escoamento superficial (*runoff*) e sua redistribuição entre os reservatórios.

Na Etapa 3, com a fixação do parâmetro α em 0,7, observa-se novo ajuste interno do modelo, com leve redução da contribuição do escoamento lento e aumento do escoamento rápido, mantendo-se, contudo, desempenho elevado ($NSE > 0,9$). Esses resultados evidenciam que diferentes combinações paramétricas podem produzir respostas hidrológicas semelhantes.

Essa compensação entre parâmetros é descrita na literatura como *equifinalidade*, conceito introduzido por Beven e Binley (1992) no âmbito da modelagem hidrológica. Segundo os autores, múltiplos conjuntos de parâmetros podem ser igualmente capazes de reproduzir satisfatoriamente as observações, ainda que representem processos internos distintos. No presente estudo, a equifinalidade manifesta-se por meio da compensação entre parâmetros como α , K_s e β , permitindo ao modelo manter elevado desempenho mesmo diante de diferentes configurações internas.

Dessa forma, uma vez que o modelo não representa explicitamente todos os processos físicos atuantes na bacia (como estruturas de retenção), observa-se um ajuste compensatório entre parâmetros correlacionados. Consequentemente, os valores calibrados podem não ser fisicamente representativos das condições reais de escoamento, ou ao menos não corresponder à melhor parametrização para a adequada representação dos processos hidrológicos na bacia.

Ressalta-se, no entanto, que a bacia do rio Aricanduva é fortemente influenciada por estruturas de controle de cheias, destacando-se a presença de diversos reservatórios de retenção (piscinões). Na sub-bacia analisada neste estudo, identificam-se seis dessas estruturas, cuja operação exerce influência direta sobre a dinâmica das vazões, especialmente por meio da atenuação e do retardo dos picos de cheia (Ferreira e Rocha, 2023). Esses reservatórios atuam armazenando temporariamente o volume escoado durante eventos intensos e liberando-o de forma gradual, o que resulta em hidrogramas mais amortecidos e com menor contribuição imediata do escoamento rápido.

Dessa forma, verifica-se que o modelo busca reproduzir o efeito dos reservatórios de retenção não por meio de uma representação física explícita, mas sim por ajustes paramétricos compensatórios, o que reforça a presença de equifinalidade e limita a interpretabilidade física dos parâmetros calibrados. Nesse contexto, recomenda-se a adoção de abordagens de modelagem que incorporem explicitamente a influência dos reservatórios de retenção por meio de modelos hidrológicos mais complexos. Ou ainda, alternativamente, a aplicação de estratégias de calibração que considerem essas limitações estruturais, de modo a representar de forma mais realista os processos hidrológicos observados na bacia.

Tabela 2 – Descrição dos eventos, NSE e parâmetros de calibração

Evento	Período	I _{med} Precip. (mm/Δt)	Mediana de Vazão (m³/s)	Tipo evento	Etapas de modelagem	NSE Calibração 1	NSE Calibração 2	NSE Calibração 3
1	06/04/17 20:00 – 07/04/17 18:00	0,69	22,22	Forte	Validação	0,88	0,84	0,81
2	08/01/19 15:00 – 09/01/19 2:35	0,19	4,46	Médio	Validação	0,22	-0,101	-0,11
3	16/02/19 8:00 – 17/02/19 12:00	0,56	28,98	Forte	Calibração	0,97	0,92	0,91
4	10/03/19 14:50 – 11/03/19 9:20	0,73	30,37	Forte	Calibração	0,93	0,90	0,88
5	16/03/20 12:45 – 17/03/20 17:15	0,20	1,42	Médio	Calibração	0,78	0,75	0,67
6	16/01/22 18:00 – 17/01/22 12:00	0,28	2,55	Médio	Validação	0,80	0,84	0,84
7	29/01/23 12:00 – 30/01/23 7:25	0,50	0,16	Fraco	Validação	-134,39	-150,88	-165,29
8	23/12/23 18:00 – 24/12/23 16:00	0,55	41,35	Forte	Validação	0,66	0,66	0,39
9	17/01/24 12:00 – 18/01/27 12:00	0,09	0,99	Fraco	Calibração	0,87	0,40	0,40
10	24/01/25 12:00 – 25/01/25 12:00	0,12	0,02	Fraco	Calibração	-122,98	-38,09	-36,97
Parâmetros calibrados								
	NSE	C_{max} (mm)	β (unidimensional)	α (unidimensional)	K_s (Δt⁻¹)*	K_q (Δt⁻¹)		
Calibração 1	0,93	7,421	0,33	0,40	0,265	0,27		
Calibração 2	0,92	5,340	5,00	0,60	0,020	0,240		
Calibração 3	0,90	5,398	5,00	0,70	0,018	0,224		

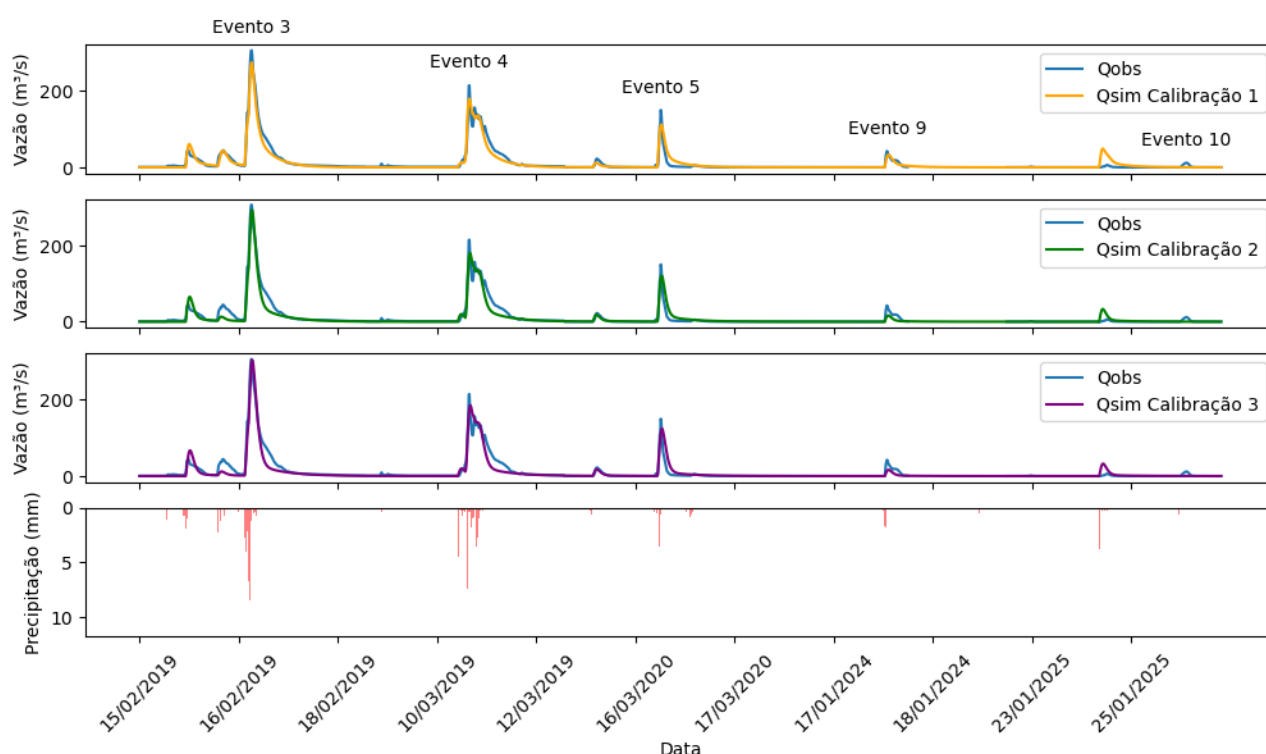


Figura 3 – Vazões observadas e simuladas nas etapas de calibração, além de precipitação interpolada para a bacia

4. Conclusão

Os resultados obtidos evidenciam inicialmente que o modelo HYMOD foi capaz de reproduzir o hidrograma observado na bacia do rio Aricanduva. No entanto, a análise detalhada dos parâmetros revela a presença de equifinalidade, na medida em que diferentes combinações paramétricas produziram respostas hidrológicas semelhantes, ainda que associadas a representações internas distintas dos processos de escoamento. Observou-se, ainda, que a ausência de representação explícita das estruturas de retenção levou o modelo a ajustar seus parâmetros de forma compensatória, como evidenciado por valores pouco realistas de α e pela elevação do parâmetro β , comprometendo a interpretabilidade física dos resultados. Dessa forma, conclui-se que, embora modelos conceituais simplificados como o HYMOD possam ser adequados para simulações gerais de vazão, sua aplicação em bacias urbanas altamente modificadas requer cautela, sendo recomendada a incorporação explícita de estruturas hidráulicas ou o uso de abordagens de modelagem mais representativas para uma adequada descrição dos processos hidrológicos.

REFERÊNCIAS

- BEVEN, K. J.; BINLEY, A. M. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, v. 6, n. 3, p. 279–298, 1992. DOI: 10.1002/hyp.3360060305.
- FERREIRA, M. J.; DA ROCHA, H. R. *Green roof infrastructure outperforms grey technology in flood mitigation in São Paulo's urbanized region*. *Frontiers in Built Environment*, v. 9, p. 1254942, 2023. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1254942.
- FERREIRA, M. J.; ROCHA, H. R. da. Hazard classification, social and economic losses in flooded urban areas. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, [S. l.], v. 120, 105395, 2025. Disponível em: 10.1016/j.ijdr.2025.105395. Acesso em: 7 maio 2026.
- FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA [FCTH]. *Caderno de bacia hidrográfica: bacia do córrego Aricanduva*. 2. ed. São Paulo: FCTH/SIURB, 2022. 278 p. ISBN 978-65-89429-06-7.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo demográfico 2022*. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/downloads-estatisticas.html>. Acesso em: 7 maio 2026.
- MOORE, R. J. The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales. *Hydrological Sciences Journal*, [S. l.], v. 30, n. 2, p. 273-297, 1985. Disponível em: doi.org. Acesso em: 7 maio 2026
- SONG, X.; MO, Y.; XUAN, Y.; WANG, Q. J.; WU, W.; ZHANG, J.; ZOU, X. Impacts of urbanization on precipitation patterns in the Greater Beijing–Tianjin–Hebei metropolitan region in northern China. *Environmental Research Letters*, v. 16, n. 1, p. 014042, 2021. DOI: 10.1088/1748-9326/abd212.
- WAGENER, T. et al. A framework for development and application of hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 13-26, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-5-13-2001>. Acesso em: 7 maio 2026.
- WAGENER, T.; WHEATER, H. S. Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. *Journal of Hydrology*, [S. l.], v. 320, n. 1-2, p. 132-154, 2006.

AGRADECIMENTOS - Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida ao primeiro autor (processo 381989/2024-0) e financiamento pela Chamada CNPq/MCTI N° 15/2023 – Eventos Meteorológicos Extremos: Prevenção de Desastres Naturais e Minimização de Danos (processo 446029/2023-8).