

ESTIMATIVA DE INCERTEZAS LOCAIS PARA PREVISÕES DETERMINÍSTICAS DE INUNDAÇÕES URBANAS

Marcos Roberto Benso¹; Maria Clara Fava²; Aná Floriano Vasconcelos³; Marina Batalini de Macedo⁴; Greicelene Jesus da Silva⁵; Maria Elisa Leite Costa⁶; Alan Vaz Lopes⁷; Beliana Cavalcante Sawada de Carvalho⁸; Thiago Souza Biscaro⁹; Javier Tomasella¹⁰

RESUMO - Este trabalho apresenta a aplicação do método Bluecat para avaliar a incerteza de simulações determinísticas de vazões de inundações em áreas urbanas na escala temporal sub-horária. As simulações do modelo hidrológico concentrado conceitual HyMod com 5 parâmetros são ajustadas em termos do seu viés estatístico das previsões determinísticas em conjunto com seus intervalos de confiança. A calibração do modelo hidrológico é feita para 16 eventos de inundação históricos e validada para a inundação de fevereiro de 2025. A seleção dos melhores parâmetros do modelo é feita por meio de um exercício de validação cruzada indicando uma performance de calibração com KGE de 0,56. Para os eventos de calibração, a metodologia Bluecat foi empregada para realizar previsões estocásticas a partir do HyMod com melhora significativa da performance de validação sendo KGE 0,53 e 0,69 para validação do modelo determinístico e estocástico respectivamente. Este trabalho demonstra a aplicabilidade do modelo conceitual concentrado HyMod para simulações hidrológicas de inundações em áreas urbanas e escala temporal sub-horária bem como demonstra o potencial da metodologia Bluecat para melhora das previsões hidrológicas com contribuição direta para sistemas de alerta de curto e curtíssimo prazo.

Palavras-chave: incerteza hidrológica, inundações urbanas, Bluecat

ABSTRACT - This work presents the application of the Bluecat framework to evaluate the uncertainty of deterministic flood flow simulations in urban areas at a sub-hourly time scale. The simulations from the conceptual lumped hydrological model HyMod, featuring five parameters, are adjusted regarding the statistical bias of deterministic predictions alongside their confidence intervals. The hydrological model calibration is performed for 16 historical flood events and validated for the February 2025 flood. The selection of the best model parameters is conducted through a cross-validation exercise, indicating a calibration performance with a KGE of 0.56. For the validation event, the Bluecat methodology was employed to perform stochastic predictions based on HyMod, resulting in a significant improvement in validation performance, with KGE values of 0.53 and 0.69 for the deterministic and stochastic model validation, respectively. This work demonstrates the applicability of the HyMod conceptual lumped model for hydrological flood simulations in urban areas at a sub-hourly time scale, as well as the potential of the Bluecat methodology to improve hydrological forecasts, providing a direct contribution to short-term and very-short-term warning systems.

Keywords: hydrological uncertainty, urban floods, Bluecat

¹Universidade de São Paulo, marcosbenso@usp.br

²Universidade Federal de São Carlos, mcfava@ufscar.br

³Universidade Federal de São Carlos, anai.vasconcelos@ufscar.br

⁴Universidade Federal de Itajubá, marinamacedo@unifei.edu.br

⁵Universidade Federal de São Carlos, greicelene.dasilva@gmail.com

⁶Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, maria.costa@ana.gov.br

⁷Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, alanvazlopes@gmail.com

⁸Universidade Estadual Paulista, beliana.sawada@unesp.br

⁹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, thiago.biscaro@inpe.br

¹⁰Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, javier.tomasella@inpe.br

INTRODUÇÃO

A confiabilidade das previsões hidrológicas é fundamental para sistemas de alerta de curto e curtíssimo prazo eficientes. Bacias hidrográficas urbanas tem como características baixos tempos de concentração e alta impermeabilidade, o que as torna suscetíveis à inundações bruscas. A previsão hidrológica nessas regiões torna-se um grande desafio que decorre da carência de dados hidrológicos confiáveis, incertezas inerentes aos modelos hidrológicos e também dos próprios dados, além do avanço na compreensão da heterogeneidade dos processos hidrológicos (Hrachowitz et al., 2013; Wagener and Montanari, 2011).

Na modelagem hidrológica de bacias pouco monitoradas, destacam-se as incertezas epistêmicas e aleatórias. As incertezas epistêmicas estão relacionadas à falta de conhecimento sobre os sistemas, tanto em termos de estrutura dos modelos quanto em termos de seus parâmetros, e também à falta de conhecimento sobre os dados que representam o sistema. Por outro lado, as incertezas aleatórias emergem da natureza estocástica de variáveis ambientais (Beven, 2016). De acordo com Beven (2000); Wagener and Montanari (2011), o método clássico de avaliar a incerteza em bacias com poucos dados envolve selecionar o melhor conhecimento à priori da estrutura do modelo que será usado para fazer as previsões. Após a escolha da estrutura dos modelos, o foco inicial deve ser identificar os parâmetros mais apropriados do modelo, o que envolve ter registros suficientemente longos para garantir uma calibração tradicional (Wagener and Montanari, 2011; Koutsoyiannis and Montanari, 2022a).

Para previsões hidrológicas em bacias urbanas, os principais desafios ainda permanecem: a calibração adequada, devido à falta de registros históricos longos em escalas temporais e espaciais adequadas, o que fatalmente implica em poucas observações de eventos em que realmente ocorreram inundações; a seleção de modelos cuja estrutura permita fácil interpretação; e a aplicação de métodos de avaliação de incerteza robustos e com solidez estatística.

Este trabalho visa demonstrar o potencial de simulações estocásticas para a análise de incerteza a partir de modelos determinísticos em áreas urbanas sujeitas à inundações. Este trabalho propõe uma metodologia de calibração do modelo conceitual concentrado HyMod com cinco parâmetros para escala temporal sub-horária, com uma estratégia de calibração por evento e validação cruzada para seleção do melhor conjunto de parâmetros, e aplicação do método Bluecat para estimativa de incertezas locais, transformando as simulações determinísticas do HyMod em uma previsão estocástica de hidrogramas de inundação.

METODOLOGIA

Área de estudo e dados

A bacia do Aricanduva está localizada na cidade de São Paulo (Fig. 1), em uma região preponderantemente urbanizada, com cerca de 86,2% de sua área destinada a uso e ocupação urbanos (Project, 2025). A área da bacia é circundada pela Serra da Cantareira ao norte e pelo rio Tietê ao sul, sendo o Aricanduva um de seus tributários. A bacia do Aricanduva possui postos hidrológicos

com sensores de nível com frequência de medição de 10 min em seu canal principal mantidos pelo Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo (SAISP). Além das medições de nível, existem um total de 14 postos que contam com medições de precipitação também em um intervalo de 10 min.

Os dados de precipitação foram interpolados usando o inverso do quadrado da distância para área da bacia de estudo. O algoritmo foi implementado utilizando o pacote gstat em R (Pebesma, 2004).

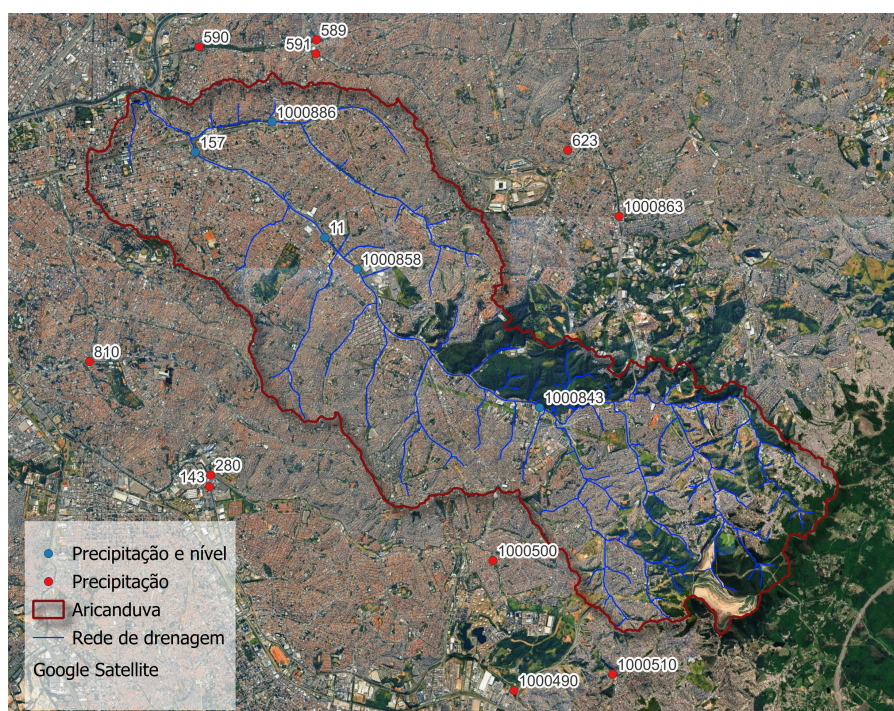


Figura 1: Área de estudo

Fonte: Autores

O posto hidrológico 1000858, com uma área de contribuição de 73 km², está localizado em um ponto estratégico, pois, a jusante, existem regiões suscetíveis a inundações em que se têm registrado diversos eventos nos últimos anos (Batalini de Macedo et al., 2024). Além disso, o posto possui uma curva chave, o que possibilita seu uso para modelagem hidrológica voltada para a previsão de eventos de inundação.

Modelagem hidrológica

O modelo hidrológico conceitual concentrado HyMod é baseado no princípio da distribuição probabilística da ocorrência de variáveis hidrológicas em uma bacia hidrográfica Moore (1985) que foi proposto por Boyle et al. (2003) considerando como dados de entrada a Precipitação, Evapotranspiração Potencial e um conjunto de cinco parâmetros calibráveis. Conforme descrito por Bastola (2022), esses parâmetros são C_{max} , capacidade máxima de armazenamento de água no solo, e β que é o fator que define a variabilidade espacial da capacidade solo-umidade conforme a equação 1.

$$F(C) = 1 - \left(1 - \frac{C}{C_{max}}\right)^{\beta}, 0 \leq C \leq C_{max} \quad (1)$$

em que $F(C)$ é a função que define a distribuição do armazenamento de água no solo na bacia C .

O parâmetro *alpha* divide o escoamento gerado a partir do armazenamento do solo em dois tipos de reservatórios: o lento e o rápido. O reservatório rápido é composto por uma sequência de três reservatórios lineares que são controlados pelo parâmetro k_r , que representa o tempo de residência nos reservatórios rápidos em $1/dia$. O reservatório lento é composto por um único reservatório linear controlado por k_l que é o tempo de residência no reservatório lento também em $1/dia$.

A otimização, ao invés da lógica da simulação contínua, foi conduzida pela lógica da separação de eventos. Inicialmente, a série de 2010 a 2024 foi separada em eventos usando como critério um intervalo entre eventos de 6 horas e o limiar de precipitação de 1 mm. Desses eventos separados, foram considerados dados de 1 dia antes do evento e 1 dia e meio após o evento, e foram selecionados apenas eventos cuja vazão de pico foi superior a $80 \text{ m}^3/\text{s}$. Com isso, 17 eventos extremos foram selecionados.

Os eventos foram calibrados individualmente utilizando otimização diferencial evolutiva, implementada no pacote DEoptim no ambiente R. Mais informações sobre o método e o pacote podem ser verificadas em Ardia et al. (2011); Mullen et al. (2011). A validação da calibração para a obtenção do melhor conjunto de parâmetros foi feita por meio de um exercício de validação cruzada em que o parâmetro ótimo de um evento foi testado o evento mais recente. Com isso, foi selecionado o evento que melhor generalizou as respostas dos processos hidrológicos.

O modelo foi otimizado fazendo uma busca com os seguintes limites, considerando os parâmetros $[C_{max}, \beta, \alpha, k_r, k_l]$ inferiores e superiores lower = $[5, 0.1, 0.2, 0.5, 0.01]$ e upper = $[100, 2, 1, 1.2, 0.5]$, conforme indicado por Quan et al. (2015). A avaliação do modelo foi feita com o uso da métrica Kling-Gupta Efficiency (KGE) conforme Gupta et al. (2009).

Análise de incerteza

A análise de incerteza foi conduzida utilizando o método Bluecat que vem do inglês "Brisk local uncertainty estimator for generic simulations and predictions" proposto por Koutsoyiannis and Montanari (2022a). O método permite transformar as saídas de um modelo determinístico (D-model) em previsões estocásticas (S-model), associadas a intervalos de confiança estimados empiricamente. Inicialmente, o modelo determinístico é calibrado utilizando dados históricos observados. Em seguida, para cada nova simulação realizada, o método identifica no conjunto histórico simulações com comportamento semelhante ao valor previsto pelo D-model no instante analisado. A partir desse procedimento, é selecionado um conjunto de $m1+m2+1$ simulações vizinhas, em que $m1$ e $m2$ representam, respectivamente, o número de simulações historicamente próximas abaixo e acima da predição determinística. A distribuição dessas simulações vizinhas é então utilizada para estimar uma predição representativa (por exemplo, média ou mediana) e os respectivos intervalos de confiança associados à

vazão simulada. O método foi aplicado usando o pacote Bluecat em R (Montanari and Koutsoyiannis, 2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibração do modelo

A calibração do modelo por eventos demonstra uma variabilidade de parâmetros que otimiza a simulação dos hidrogramas. O resultado da validação cruzada é indicado na linha vertical apresentada na Fig. 2, com a indicação de que, para a maior parte dos casos, o melhor parâmetro coincide com a tendência central indicada pelos pontos de maior densidade no gráfico. A Tabela 1 apresenta o resultado do melhor conjunto de parâmetros conforme a validação cruzada.

Tabela 1: Parâmetros ótimos do modelo obtidos por validação cruzada

C_{max}	β	α	k_r	k_l
85	1.96	0.85	0.51	0.13

Fonte: Autores

A análise dos parâmetros pode ser interpretada conforme as características de bacias urbanas. O valor de C_{max} indica que a bacia tem uma capacidade de retenção próxima aos 85 mm. Já o parâmetro β , com valores próximos de 2, sugere uma distribuição não-linear da capacidade de armazenamento de água no solo, com pequenas áreas saturando rapidamente, enquanto outras permanecem secas. O valor de alfa indica que 85% do escoamento gerado na bacia se dá pelo reservatório rápido, com tempo de residência de aproximadamente 2 dias. Os demais 15% são referentes ao escoamento pelo reservatório lento, que possui um tempo de residência de 7 dias e 16 horas.

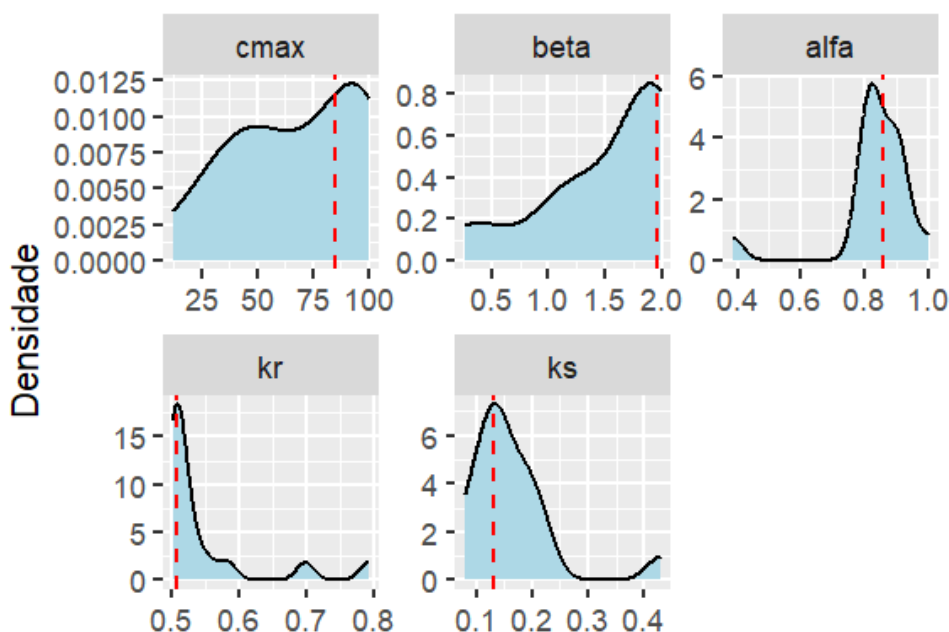


Figura 2: Distribuição dos parâmetros do HyMod calibrados por evento

Fonte: Autores

A escolha do modelo por validação cruzada considera encontrar o conjunto de parâmetros que melhor generaliza o modelo hidrológico para a previsão de novos eventos de inundação. A Figura 3 mostra os resultados das simulações para os 16 eventos utilizados para calibração, que foram simulados com o melhor conjunto de parâmetros (ref. Tabela 2). Observa-se uma boa correspondência visual dos hidrogramas simulados, com KGE variando de -0,89 a 0,93, e valor médio de 0,62. Apesar de alguns casos a performance da simulação não ter sido satisfatória em relação à métrica de performance, o comportamento do hidrograma foi correspondente com o evento real em termos de ascensão e recessão dos hidrogramas.

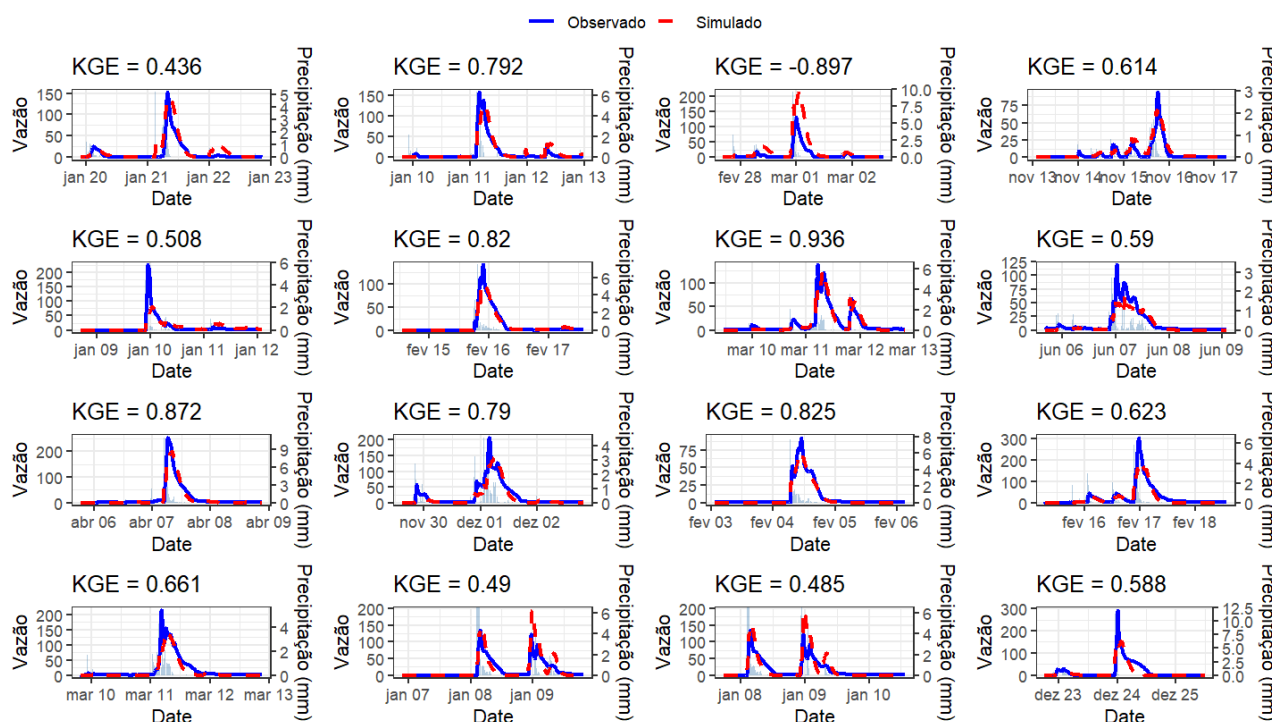


Figura 3: Resultado da validação cruzada no processo de calibração

Fonte: Autores

Análise de incerteza da previsão de inundações

A validação da modelagem estocástica com análises de incertezas locais baseadas em simulações determinísticas foi feita em um evento de inundação recente que ocorreu entre "2025-01-30" e "2025-02-04" e causou severos danos em toda a região metropolitana, especialmente na zona leste, onde a área de estudo se localiza. Com base nos dados interpolados de chuva, o total precipitado do evento foi de 225 mm com intensidade máxima de 22 mm/h registrados às 2 horas da manhã do dia primeiro de fevereiro. Os resultados da aplicação do Bluecat (Figura 4) demonstram a robustez das predições estocásticas, com indicação dos intervalos de confiança e também da predição média obtida por meio da mediana.

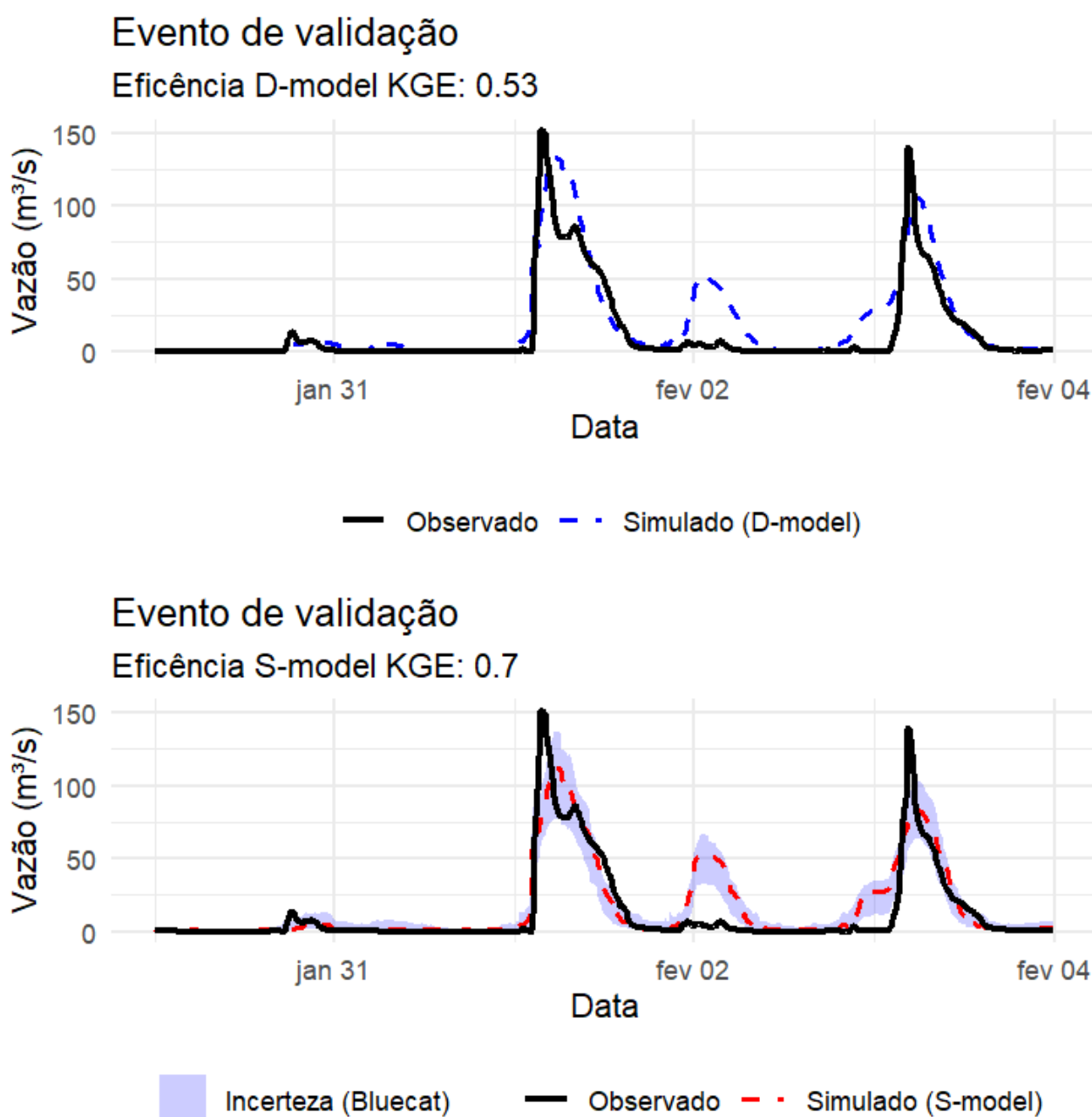


Figura 4: Rodada de previsão de evento de inundação com o análise de incerteza com o Bluecat
Fonte: Autores

Os resultados da validação demonstrados na Figura 4 e Tabela 2 indicam uma melhora significativa das previsões feitas pelo S-model (mediana) em relação ao D-model. A performance do D-model foi com KGE de 0,53, com Pbias 45 e erro de 8,41 m³/s. O S-model melhorou a performance do modelo, aumentando o KGE para 0,69, reduzindo o viés para 26,60 e o erro para 7,92 m³/s. Outros estudos que aplicaram a metodologia Bluecat para previsão de vazões em escala diária têm relatado melhoria das previsões (Koutsoyiannis and Montanari, 2022a,b).

Tabela 2: Análise das etapas de modelagem hidrológica determinística e estocástica

Etapas modelagem	KGE	Pbias (%)	MAE
Calibração	0,56	28,50	7,88
Validação D-model	0,53	45	8,71
Validação S-model	0,69	26,60	7,92

Fonte: Autores

CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma implementação da metodologia Bluecat que atualiza simulações determinísticas em previsões estocásticas de inundações urbanas em escala sub-horária. Com uma metodologia de calibração por eventos e validação cruzada, apresenta-se o potencial do modelo Hy-Mod como um modelo de previsão de eventos de inundação urbana adequado para a escala sub-horária.

A metodologia Bluecat melhorou a performance das previsões de inundação em comparação com a simulação determinística do HyMod.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida ao primeiro autor (processo 381989/2024-0) e pelo financiamento através da Chamada CNPq/MCTI nº 15/2023 – Eventos Meteorológicos Extremos: Prevenção de Desastres Naturais e Minimização de Danos (processo 446029/2023-8).

REFERÊNCIAS

Referências

- ARDIA, D., BOUDT, K., CARL, P., MULLEN, K. M., AND PETERSON, B. G. (2011). “Differential Evolution with DEoptim: An application to non-convex portfolio optimization”. R Journal, 3(1), pp 27–34.
- BASTOLA, S. (2022). “The regionalization of a parameter of hymod, a conceptual hydrological model, using data from across the globe”. HydroResearch, 5, pp 13–21.
- BATALINI DE MACEDO, M., MANGUKIYA, N. K., FAVA, M. C., SHARMA, A., FRAY DA SILVA, R., AGARWAL, A., RAZZOLINI, M. T., MENDIONDO, E. M., GOEL, N. K., KURIAN, M., AND NARDOCCI, A. C. (2024). “Performance analysis of physically-based (hec-ras, caddies) and ai-based (lstm) flood models for two case studies”. Proceedings of IAHS, 386, pp 41–46.
- BEVEN, K. (2016). “Facets of uncertainty: epistemic uncertainty, non-stationarity, likelihood, hypothesis testing, and communication”. Hydrological Sciences Journal, 61(9), pp 1652–1665.
- BEVEN, K. J. (2000). “Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling”. Hydrology and earth system sciences, 4(2), pp 203–213.

- BOYLE, D. P., GUPTA, H. V., AND SOROOSHIAN, S. (2003). “Calibration of watershed models”. Wiley Online Library, pp. 185–196.
- GUPTA, H. V., KLING, H., YILMAZ, K. K., AND MARTINEZ, G. F. (2009). “Decomposition of the mean squared error and nse performance criteria: Implications for improving hydrological modelling”. *Journal of Hydrology*, 377(1), pp 80–91.
- HRACHOWITZ, M., SAVENIJE, H., BLÖSCHL, G., MCDONNELL, J., SIVAPALAN, M., POMEROY, J., ARHEIMER, B., BLUME, T., CLARK, M., EHRET, U., FENICIA, F., FREER, J., GELFAN, A., GUPTA, H., HUGHES, D., HUT, R., MONTANARI, A., PANDE, S., TETZLAFF, D., TROCH, P., UHLENBROOK, S., WAGENER, T., WINSEMIUS, H., WOODS, R., ZEHE, E., AND CUDENNEC, C. (2013). “A decade of predictions in ungauged basins (pub)—a review”. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6), pp 1198–1255.
- KOUTSOYIANNIS, D. AND MONTANARI, A. (2022a). “Bluecat: A local uncertainty estimator for deterministic simulations and predictions”. *Water Resources Research*, 58(1), pp e2021WR031215.
- KOUTSOYIANNIS, D. AND MONTANARI, A. (2022b). “Climate extrapolations in hydrology: The expanded bluecat methodology”. *Hydrology*, 9(5).
- MONTANARI, A. AND KOUTSOYIANNIS, D. (2024). *Bluecat: An R-package to apply the BLUECAT method in calibration and validation, to convert a deterministic prediction model into a stochastic model with uncertainty assessment*. R package version 0.1, commit 4347fc8af645fb2d0f57a2922dd44f78ad2e4289.
- MOORE, R. (1985). “The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales”. *Hydrological Sciences Journal*, 30(2), pp 273–297.
- MULLEN, K., ARDIA, D., GIL, D., WINDOVER, D., AND CLINE, J. (2011). “DEoptim: An R package for global optimization by Differential Evolution”. *Journal of Statistical Software*, 40(6), pp 1–26.
- PEBESMA, E. J. (2004). “Multivariable geostatistics in s: the gstat package”. *Computers & geosciences*, 30(7), pp 683–691.
- PROJECT, M. (2025). “Collection 10 of the annual land cover and transitions maps of brazil”. Online dataset. DOI: 10.58053/MapBiomass/SL8TCR; accessed on 2025-08-12.
- QUAN, Z., TENG, J., SUN, W., CHENG, T., AND ZHANG, J. (2015). “Evaluation of the hymod model for rainfall–runoff simulation using the glue method”. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 368, pp 180–185.
- WAGENER, T. AND MONTANARI, A. (2011). “Convergence of approaches toward reducing uncertainty in predictions in ungauged basins”. *Water Resources Research*, 47(6).