

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

MONITORAMENTO E MODELAGEM HIDROLÓGICA EM BACIA HIDROGRÁFICA URBANA, PELOTAS-RS

*Marília de Oliveira Felten¹; Danielle Bressiani²; Samuel Beskow³; Tamara Leitzke Caldeira
Beskow⁴; Laura Schwartz Leite⁵ & Eduardo Mendiondo⁶*

Abstract: The Experimental Urban Watershed of Canalete da Argolo, located in the central region of Pelotas, RS, has a high degree of imperviousness, which, combined with the undersizing of the drainage system, contributes to the occurrence of urban flooding. To represent its hydrological behavior during precipitation events, the HEC-HMS model was used, adopting the SCS-CN method to estimate losses, the Clark Unit Hydrograph for rainfall-runoff transformation, and the recession method for baseflow. Hydrological monitoring of the watershed was carried out through the installation of a monitoring station equipped with level sensors, limnimetric rulers, and rain gauges, enabling the collection of essential data for model calibration and validation. During the calibration stage, based on six hydrological events, an average Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient of 0.88 was obtained, indicating good agreement between observed and simulated data. In the validation stage, using five different events, the average NSE values were 0.81, 0.84, and 0.75 for the maximum, average, and minimum parameter scenarios, respectively. The results demonstrate that the model satisfactorily represents the watershed's hydrological processes, proving to be an effective tool for both flood forecasting and supporting the management of urban water resources. Additionally, the model allows for future evaluations of how different actions, like using nature-based solutions, can help reduce risks from extreme events.

Resumo: A Bacia Hidrográfica Urbana Experimental do Canalete da Argolo localizada na região central de Pelotas-RS, apresenta elevada impermeabilização, o que, associado ao subdimensionamento do sistema de drenagem, contribui para a ocorrência de inundações urbanas. Para representar seu comportamento hidrológico frente a eventos de precipitação, foi utilizado o modelo HEC-HMS, adotando o método SCS-CN para estimativa de perdas, o Hidrograma Unitário de Clark para transformação chuva-vazão e o método de recessão para escoamento de base. O monitoramento hidrológico da bacia foi realizado por meio da instalação de estação de monitoramento contendo sensores de nível, régua limimétrica, pluviômetro e pluviógrafo, permitindo a coleta de dados essenciais para a calibração e validação do modelo. Na etapa de calibração, com base em seis eventos hidrológicos, obteve-se um coeficiente médio de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,88, indicando boa aderência entre os dados observados e simulados. Na validação, utilizando cinco eventos distintos, os NSE médios foram de 0,81, 0,84 e 0,75, respectivamente, para

1) Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São Carlense, 400, Parque Arnold Schmidt, São Carlos – SP, (16) 3373-9571, mariliafelten@usp.br

2) Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, R. Gomes Carneiro, 1, Porto, Pelotas – RS, (53) 3284-3840, danielbressiani@gmail.com

3) Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, R. Gomes Carneiro, 1, Porto, Pelotas – RS, (53) 3284-3840, samuelbeskow@gmail.com

4) Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, R. Gomes Carneiro, 1, Porto, Pelotas – RS, (53) 3284-3840, tamaraleitzkecaldeira@gmail.com

5) Departamento de Solos, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas, Campus Capão do Leão, Pelotas – RS, (53) 3275-7267, lauraschwartzleite@gmail.com

6) Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São Carlense, 400, Parque Arnold Schmidt, São Carlos – SP, (16) 3373-9571, emm@sc.usp.br

os cenários com parâmetros máximos, médios e mínimos. Os resultados demonstram que o modelo representa de forma satisfatória os processos hidrológicos da bacia, mostrando-se uma ferramenta aceitável tanto para a previsão de inundações quanto para apoiar a gestão dos recursos hídricos urbanos. Além disso, o modelo permite avaliações futuras dos impactos de diferentes cenários de intervenção, como a adoção de soluções baseadas na natureza, visando à mitigação de riscos associados aos eventos extremos.

Palavras-Chave – Modelagem Hidrológica; Calibração; Drenagem Urbana.

INTRODUÇÃO

O Canaleta da Argolo, como é popularmente conhecido, é uma obra de drenagem urbana projetada pelo engenheiro sanitário Saturnino de Brito por volta de 1887, pioneiro da Engenharia Sanitária e Ambiental no Brasil. Construído em 1928, seu objetivo era solucionar os frequentes problemas de cheias na região central de Pelotas (Soares, 2001), por meio da canalização da sanga que atravessava a área, conduzindo águas pluviais e efluentes domésticos até o Arroio Pepino (Vieira, 2020). Contudo, uma consequência frequente destes processos de canalização de cursos d'água, sejam via tubulações ou canais abertos de concreto, como é o caso do Canaleta da Argolo, é o aumento da velocidade de escoamento das águas pluviais, elevando a máxima a jusante e, consequentemente, podendo gerar inundações urbanas, com impactos econômicos e sociais significativos (Canholi, 2014). Esse problema se agrava em bacias hidrográficas urbanas de pequeno porte, cujos sistemas micro e macrodrenagem, muitas vezes antigos e sem expansão proporcional ao crescimento urbano, não acompanham as mudanças no uso e ocupação do solo.

A utilização de modelos hidrológicos é uma estratégia eficaz para mitigar esses riscos, permitindo, a partir do monitoramento e de previsões de precipitação, vazão e nível dos rios, compreender a resposta hidrológica das bacias frente aos eventos de chuva. Além disso, o avanço no monitoramento hidrológico possibilita a geração de séries temporais consistentes, fundamentais para entender o processo de transformação chuva-vazão e apoiar tanto a tomada de decisão quanto a gestão dos recursos hídricos e da drenagem urbana, além de subsidiar a implementação de sistemas de alerta antecipado para eventos extremos. Esses modelos, baseados em dados históricos, permitem simular cenários futuros, tanto de curto prazo, como sistemas de alerta antecipado, quanto de longo prazo, para projeções climáticas e análises de intervenções na bacia, incluindo Soluções Baseadas na Natureza (SbN) (Steinmetz *et al.* 2019).

Assim, a integração entre hidrologia, modelagem hidrológica e monitoramento é essencial para uma gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos (Bressiani *et al.*, 2015). Nesse contexto, em parceria com o Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas (SANEP), responsável pela drenagem e serviços de saneamento básico do município, foi implantado o monitoramento hidrológico da Bacia Hidrográfica Urbana Experimental do Canaleta da Argolo (BHUECA). Posteriormente, a partir dos dados hidrológicos coletados, procedeu-se a configuração do modelo hidrológico para a bacia, abrangendo as etapas de calibração e validação do modelo, fundamentais para garantir a representatividade dos processos hidrológicos locais. Este trabalho representa o início de uma etapa fundamental para subsidiar futuras pesquisas e aplicações técnico-científicas voltadas à gestão da drenagem urbana e à mitigação dos impactos das inundações.

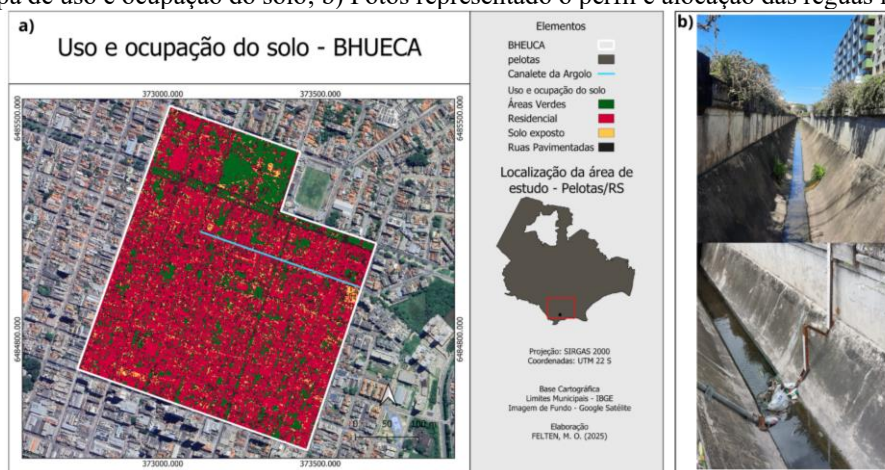
METODOLOGIA

A área de estudo corresponde à Bacia Hidrográfica Urbana Experimental do Canaleta da Argolo, situada na região central de Pelotas, no estado do Rio Grande do Sul. A bacia possui uma área de aproximadamente 0,62 km² e apresenta características tipicamente urbanas, como demonstrado na Figura 1, item a), com predominância de ruas pavimentadas, edificações residenciais,

estabelecimentos comerciais, áreas institucionais e praças, como a Praça da Catedral Metropolitana de São Francisco de Paula e a Praça Dom Antônio Zattera.

O escoamento superficial da bacia é conduzido pela rede de microdrenagem, composta por sarjetas, bocas de lobo e galerias, que direcionam as águas pluviais até o Canaleta da Argolo, uma estrutura de macrodrenagem construída em 1928. Seu perfil transversal tem formato em “V”, com taludes retos em concreto, conforme ilustrado na Figura 1, item b). O canal possui aproximadamente 2 metros de profundidade, 2,10 metros de largura no topo e 525 metros de comprimento em trecho aberto, com declividade média de 0,004 m/m (Leite, 2024).

Figura 1 - a) Mapa de uso e ocupação do solo; b) Fotos representando o perfil e alocação das réguas linimétricas.



Nos últimos dez anos, a região registrou pelo menos dois eventos em que a cota máxima do Canaleta da Argolo foi excedida. O primeiro, em 20/02/2013, quando uma chuva intensa durante uma hora e meia provocou o transbordamento do canal, alagando vias e calçadas, conforme registrado pelo Projeto Chove Chuva (2013). O segundo evento aconteceu em 19/02/2015, quando foram registrados 156 mm de precipitação, distribuídos em dois períodos: 86 mm entre 15h e 17h, e 70 mm entre 20h e 22h (Faraco, 2015). Nesse episódio, o nível da água ultrapassou a cota máxima do Canaleta (2,10 metros), cobrindo totalmente as rodas dos veículos estacionados em sua proximidade.

MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

O monitoramento hidrológico da BHUECA foi realizado em parceria com o Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas (SANEP), com o objetivo de coletar dados de precipitação e nível d'água no ponto definido como exutório da bacia. Foram instalados quatro equipamentos: dois automáticos compostos por sensor de nível e pluviômetro de báscula, conectados a uma estação hidrológica com *datalogger*, painel solar e bateria; e dois manuais, sendo um pluviômetro modelo DNAEE e réguas linimétricas, que atuam como *backup* em caso de falhas na estação e para validação dos dados.

O pluviômetro e o pluviômetro foram instalados no telhado do prédio da Brigada Militar, garantindo proteção contra furtos. As réguas linimétricas e o sensor de nível foram posicionados no interior do Canaleta da Argolo, na seção de controle. O sensor foi instalado dentro de um tubo metálico perfurado, conectado à estação hidrológica por cabos, cruzando a via pública.

A estação automática foi programada para registrar dados em intervalos de cinco minutos. Além disso, estabeleceu-se uma rotina de manutenção, com visitas quinzenais para download dos dados e limpeza semanal dos equipamentos no Canaleta, devido ao acúmulo recorrente de resíduos sólidos, especialmente após eventos de chuva intensa. O monitoramento contínuo é fundamental para a calibração do modelo hidrológico e para a construção de séries históricas de dados da bacia. Maiores

detalhamentos e visualização de imagens foram feitas em trabalhos anteriores (Felten 2023, Felten *et al.* 2023).

As vazões no exutório da bacia hidrográfica, foram estimadas pela Equação de Manning, a partir dos níveis observados, adotando-se o coeficiente de rugosidade representativo para concreto em boas condições (0,013) e utilizando os parâmetros geométricos, área e perímetro molhado, levantados por Leite (2024) em levantamento topográfico.

PARAMETRIZAÇÃO E MODELAGEM HIDROLÓGICA

A modelagem hidrológica da Bacia Hidrográfica Urbana Experimental do Canaleta da Argolo foi realizada utilizando o software *Hydrological Engineering Center - Hydrologic Modeling System*, o HEC-HMS. As aplicações deste modelo são diversas, abrangendo drenagem urbana, avaliação de impactos da urbanização previsão de vazões, e outros (USACE, 2015).

Para este estudo de caso, foram adotados três métodos principais para a representação do comportamento hidrológico da bacia: o método SCS-CN, para estimativa das perdas iniciais, o Hidrograma Unitário de Clark, para a transformação da chuva em vazão, e o método de recessão exponencial, para representação do escoamento de base.

A aplicação do método SCS-CN necessita de dois parâmetros principais: o *Curve Number* (CN), que representa as condições de cobertura do solo conforme seu uso e grupo hidrológico pertencente, e a porcentagem de área impermeável. Para isto, foram utilizados mapas de uso e ocupação de solo elaborados por Santos (2021) e Felten (2023), aliados ao mapa de solos da região, apresentado por Cunha *et al.* (2006), além da tabela de valores de CN conforme grupo hidrológico, disponibilizada por Tucci (2015). O valor percentual de área impermeável foi determinado a partir do somatório dos polígonos classificados como impermeáveis (residências e ruas asfaltadas), em relação à área total.

Considerando dois processos para a transformação da chuva efetiva em vazão (translação e atenuação), o Hidrograma Unitário de Clark relaciona, tempo de deslocamento do escoamento direto com a parte da bacia que efetivamente contribui para a vazão no exutório, associado ao armazenamento de água que ocorre ao longo da bacia (USACE, 2000). Sua utilização no HEC-HMS necessita dois parâmetros, o tempo de concentração da bacia e o coeficiente de armazenamento.

Para calcular o tempo de concentração (T_c), foram adotadas quatro metodologias, sendo três indicadas por Silveira (2005) e Paulino (2014), por apresentarem melhores resultados para bacias urbanas. Silveira avaliou 23 fórmulas e indicou as de Carter (1961), Shaake (1967) e Kirpich como as mais adequadas para áreas urbanas. Paulino (2014) confirmou que a equação de Kirpich resulta em picos de vazão maiores e menor tempo de pico, enquanto a de Carter forneceu valores de T_c mais elevados. Além disso, foi aplicada a equação de Osman e Abustan (2012), desenvolvida para eventos extremos na Malásia. As quatro fórmulas foram testadas na Bacia Hidrográfica Urbana Experimental do Canaleta da Argolo, sendo comparadas aos dados monitorados para identificar a mais representativa, o que também auxiliou na calibração do modelo fornecendo um intervalo de valores aceitáveis para T_c . Com os valores de T_c calculados, adotou-se a metodologia proposta por Gupta (2008) para a definição do coeficiente de armazenamento (K), considerando seu valor correspondente a 60% do tempo de concentração (T_c) da bacia.

Por fim, o método da recessão exponencial, no HEC-HMS exige como dados de entrada a vazão inicial do trecho do canal em m^3/s , estimada através da Equação de Manning para a bacia em estudo em aproximadamente $0,004 m^3/s$, além da definição da constante de recessão (α), adotando-se um valor inicial de 0,1.

A avaliação do desempenho do modelo hidrológico desenvolvido para a Bacia Hidrográfica Urbana Experimental do Canaleta da Argolo foi realizada com base na análise conjunta dos índices

de qualidade fornecidos pelo HEC-HMS e dos critérios de classificação de desempenho propostos por Moriasi *et al.* (2007). Dentre os índices fornecidos pelo *software* estão: o coeficiente de determinação (R^2), o *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o percentual de viés (PBIAS).

RESULTADOS

MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

Durante o período de monitoramento alguns imprevistos ocorreram, dentre eles problemas técnicos relativos à estação de monitoramento hidrológico e seus cabos, sendo necessário seu envio aos fabricantes, o que resultou em algumas falhas e atrasos nos registros. No entanto, de 18 de maio de 2023 até 17 de agosto 2023, foram coletados dados de modo contínuo, o que permitiu a observação de 16 eventos de precipitação, conforme apresentado na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Compilado dos principais eventos hidrológicos registrados.

ID	Dia de início	Duração (h)	Nível máximo (m)	Precipitação total (mm)
1	26/05/2023	8,33	0,43	12,32
2	10/06/2023	7,83	0,33	6,16
3	15/06/2023	19,08	0,34	20,02
4	21/06/2023	11,25	0,27	9,9
5	25/06/2023	4,67	0,51	6,6
6	25/06/2023	7,00	0,51	6,16
7	28/06/2023	9,50	0,50	9,02
8	06/07/2023	11,42	0,55	18,04
9	07/07/2023	21,33	0,45	20,24
10	12/07/2023	42,50	1,18	116,82
11	20/07/2023	12,00	0,22	6,16
12	24/07/2023	20,00	0,46	30,14
13	25/07/2023	20,00	1,02	64,46
14	06/08/2023	5,92	0,18	4,84
15	07/08/2023	5,75	0,47	7,7
16	11/08/2023	9,58	0,62	16,5

A numeração foi atribuída de forma cronológica, e o critério adotado para separação dos eventos consistiu em um intervalo de 20 minutos antes da primeira basculada e 40 minutos após o do nível d'água do Canaleta retornar ao valor usual, registrando, assim, a recessão do hidrograma.

O evento 10, destacado na Tabela 1, foi o primeiro evento extremo de alta precipitação capturado pelo monitoramento, associado à passagem de um ciclone extratropical pelo Rio Grande do Sul, que provocou fortes ventos e chuvas intensas. Esse evento teve duração aproximada de dois dias, com o nível do Canaleta atingindo 82 centímetros abaixo da cota máxima, alcançando o pico após uma chuva intensa de 26,4 mm acumulados em 2 horas e 18 minutos.

Percebe-se que eventos com precipitações totais semelhantes, como os eventos 2, 5, 6 e 11 (cerca de 6 mm), não resultaram necessariamente em níveis máximos equivalentes. Esse comportamento evidencia que a resposta do nível d'água não está condicionada apenas ao volume total precipitado, mas também à intensidade da chuva e às condições hidrológicas prévias, como a umidade do solo. De modo geral, eventos de menor duração, porém mais intensos, tendem a gerar níveis máximos mais elevados. Um padrão semelhante é observado na comparação entre os eventos 12 e 13, que, apesar de apresentarem a mesma duração (20 horas), diferem significativamente no

volume precipitado: o evento 13 registrou aproximadamente o dobro da precipitação do evento 12, refletindo também em um nível máximo quase duas vezes maior.

Essa análise demonstra que, sob condições de chuvas intensas, a cota máxima comportada pelo Canalete da Argolo pode ser ultrapassada, ocasionando alagamentos nas áreas adjacentes. Nesse contexto, o monitoramento contínuo torna-se fundamental para gerar séries históricas de precipitação, nível e vazão que, aliadas às características da BHUECA, subsidiam estudos sobre a transformação chuva-vazão, a ocorrência de cheias, as vazões máximas e sua recorrência. Esses dados são essenciais para desenvolver Soluções Baseadas na Natureza (SbN), modelos hidrológicos e hidráulicos, além de sistemas de alerta antecipado, fortalecendo a gestão dos recursos hídricos e da drenagem urbana da bacia.

A partir dos eventos observados, com o intuito de dar seguimento à modelagem hidrológica, foram definidos dois grupos com alguns eventos, um destinado a calibração do modelo contendo os eventos 1, 5, 7, 8, 10 e 12, e outro voltado à validação, com os eventos 6, 9, 13, 15 e 16.

MODELAGEM ORIENTADA POR EVENTOS

O modelo foi iniciado com a inserção do modelo digital de elevação da área, seguido do processamento da rede de drenagem e da importação da delimitação da bacia, realizada manualmente, pois, por se tratar de uma bacia urbana, a drenagem não necessariamente segue a declividade natural do terreno.

Os parâmetros necessários, descritos anteriormente, foram calculados e adicionados ao modelo, juntamente com os dados dos eventos de precipitação e suas respectivas vazões calculadas. O valor encontrado para o *Curve Number* (CN) foi de 90,7, adotando a condição II de umidade do solo, considerando os respectivos valores para cada uso e ocupação. A porcentagem de área impermeável da bacia foi estimada em 73%.

Os valores obtidos para o tempo de concentração (T_c), em horas, conforme cada metodologia foram: 0,34 (Carter); 0,18 (Schaake); 0,33 (Kirpich); 0,12 (Osman&Abustan). O valor adotado inicialmente foi o de Carter, por apresentar maior compatibilidade com os dados observados no monitoramento hidrológico. A partir desse T_c , o valor calculado para o coeficiente de armazenamento (K), correspondente a 60% do tempo de concentração, foi de 0,20 horas.

Com o modelo configurado com as características da bacia urbana, foram iniciadas as rodadas de calibração, tendo como base os 6 eventos selecionados, 1, 5, 7, 8, 10 e 12.

O objetivo da calibração foi ajustar a hidrógrafa simulada à observada, de forma que os valores simulados reproduzissem com precisão a vazão observada, especialmente em relação ao pico, ao formato da curva e ao tempo de ocorrência. Esse ajuste foi conduzido mantendo os parâmetros dentro de intervalos fisicamente plausíveis e coerentes com as características da bacia. Dessa forma, os parâmetros *Curve Number* (CN), tempo de concentração (T_c), constante de recessão (α) e coeficiente de armazenamento (K) foram calibrados utilizando o método Simplex, buscando minimizar o erro quadrático médio entre os valores simulados e observados. Na tabela 2, apresentada a seguir, estão listados os parâmetros otimizados para cada evento, juntamente com os respectivos índices de qualidade de desempenho do modelo.

Tabela 2 – Parâmetros otimizados para os eventos selecionados.

Parâmetro	Valor otimizado para cada evento					
	1	5	7	8	10	12
CN	76,86	89,19	73,88	66,34	72,93	80,45
Tc (h)	0,26	0,32	0,30	0,25	0,21	0,29
K (h)	0,89	0,76	0,65	0,71	0,47	0,65
α	0,96	0,80	0,76	0,79	0,52	0,75
NSE	0,58	0,64	0,84	0,93	0,93	0,92
RMSE	0,6	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3
PBIAS	44%	54%	8,9%	7,1%	-2,2%	-6,1%

Com base nos critérios estabelecidos por Moriasi *et al.* (2007), que consideram um modelo como muito bom quando apresenta um NSE entre 0,65 e 1, e bom quando varia entre 0,55 e 0,65, observa-se que, após a calibração, o modelo desenvolvido apresentou um desempenho satisfatório, com NSE médio de 0,88.

Resultados semelhantes foram obtidos no estudo de Yuan, Liu e Wan (2019), que analisaram precipitações críticas e suas respectivas inundações na bacia hidrográfica de Peihe na China. Neste trabalho, os autores encontraram um NSE médio de 0,8 e concluíram que as simulações foram eficazes na representação da hidrologia da bacia estudada.

Desempenho semelhante também foi observado por Barbosa *et al.* (2019), que, ao avaliar o comportamento hidrológico de uma bacia urbana do Rio Uberaba (MG) utilizando o HEC-HMS, obtiveram NSE de 0,63 na calibração, concluindo que o modelo representa adequadamente os processos hidrológicos. Os autores destacaram que a subdivisão da bacia não necessariamente melhora o desempenho, e que o modelo é uma ferramenta confiável para estudos de drenagem urbana e suporte à formulação de políticas públicas de uso do solo e controle de enchentes. No entanto, com exceção dos dois últimos eventos, o modelo apresentou uma tendência significativa de superestimar as vazões simuladas, chegando a estimar quase o dobro da vazão observada no evento 5. Esse comportamento pode estar relacionado à ocorrência de chuvas antecedentes, reduzindo a capacidade de infiltração e armazenamento do solo, aumentando o volume de escoamento superficial direto.

VALIDAÇÃO

A validação do modelo calibrado para a Bacia Hidrográfica Urbana Experimental do Canalete da Argolo foi realizada utilizando cinco eventos selecionados (6, 9, 13, 15 e 16), aplicando-se três conjuntos de parâmetros: mínimos, médios e máximos obtidos na calibração. Esse procedimento teve como objetivo estimar intervalos de confiança representativos do comportamento hidrológico da bacia. Dessa forma, para cada evento foram gerados três hidrogramas distintos.

Tabela 3 – Valores utilizados para cada modo de validação.

Parâmetro	Unidade	Mínimo	Médio	Máximo
CN	Adimensional	66,34	75,37	89,19
Tc	Horas	0,21	0,28	0,32
α	Adimensional	0,47	0,68	0,89
K	Horas	0,52	0,77	0,96

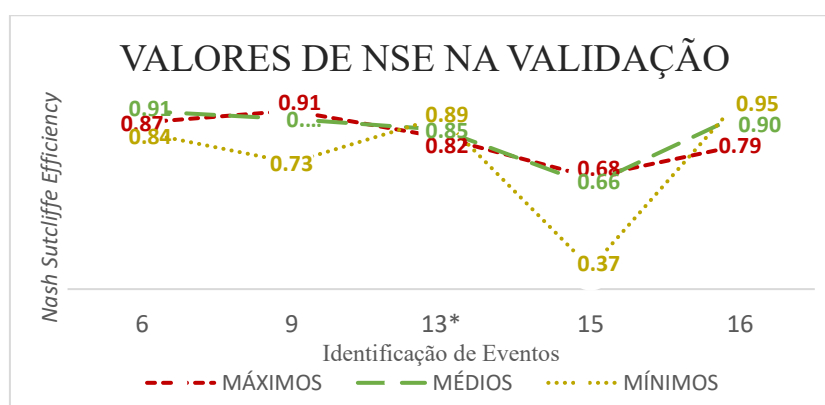
A data prevista para a ocorrência da vazão de pico foi a mesma em quase todas as simulações, independentemente do conjunto de parâmetros utilizado. Observou-se, contudo, pequenas variações no horário: com os parâmetros mínimos, o pico ocorreu, em média, cinco minutos após o observado; com os máximos, dez minutos depois; e com os valores médios apenas quatro minutos após.

As rodadas de validações com o evento 13 apresentaram poucas diferenças entre as vazões simuladas e observadas, com um NSE médio de 0,88 e PBIAS médio de -0,007. Esses resultados são particularmente relevantes, pois esse evento, dentre os utilizados na validação, registrou a maior precipitação acumulada e um nível máximo semelhante ao observado durante a passagem do ciclone, que foi o único evento extremo monitorado pela estação automática até então. Esses resultados preliminares reforçam o bom desempenho do modelo, especialmente no contexto da problemática central do estudo, que é a previsão e prevenção de cheias e alagamentos em áreas urbanas.

No entanto, ressalta-se que, para o evento 9, utilizando os parâmetros máximos, a data e hora previstos para a vazão de pico apresentaram grande divergência em relação aos dados observados. Esse evento em particular, contou com três períodos de maior intensidade de precipitação, resultando na formação de três picos no hidrograma, em que, para o modelo o terceiro apresentou maior vazão.

Na Figura 3 a seguir estão representados os valores de NSE obtidos para cada evento simulado, de acordo com os parâmetros mínimos (amarelo), médios (verdes) e máximos (vermelho). O evento 13 está sinalizado pois, após análises mais detalhadas, identificou-se que se trava, na verdade, de dois eventos distintos, sendo utilizado, nestas simulações, apenas o primeiro.

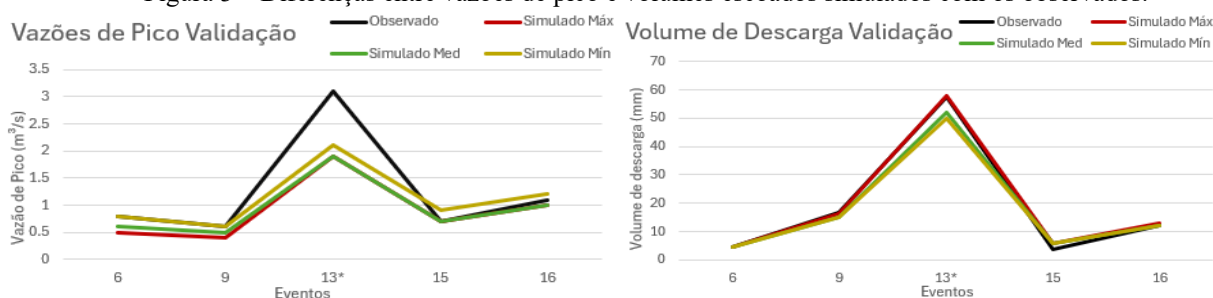
Figura 2 – Intervalo de NSE na validação.



De modo geral o modelo apresentou bons ajustes para os parâmetros médios e máximos, apresentando, porém, forte discrepância no evento 15 quando foram utilizados os parâmetros mínimos. Essa diferença significativa pode ser compreendida por este evento ter ocorrido logo após outro, alterando as condições de umidade do solo e capacidade de armazenamento. Outro aspecto relevante é que, com valores menores para o coeficiente de armazenamento (K), as vazões simuladas tendem a ser maiores. Essa tendência à superestimação é corroborada pelo PBIAS elevado de 57,42%. O mesmo comportamento foi observado nas três simulações realizadas para este evento, o que indica a necessidade de estudos futuros mais aprofundados, a fim de investigar as causas e propor ajustes no modelo.

Na Figura 3, estão apresentados os diferenciais encontrados para as vazões de pico e volume de descarga, quando comparadas aos valores observados.

Figura 3 – Diferenças entre vazões de pico e volumes escoados simulados com os observados.



Nota-se que, de modo geral, os três ajustes acabaram subestimando os valores de vazão de pico, embora tenham apresentado resultados muito próximos entre os volumes simulados e observados. Esse comportamento pode ser atribuído às incertezas atreladas à estimada da vazão, uma vez que foi utilizado um perfil transversal aproximado para os cálculos hidráulicos, o qual pode não representar adequadamente toda a extensão do canal. Para uma representação mais fidedigna, o mais adequado seria a utilização da curva-chave calibrada para a seção de interesse. Além disso, devem ser consideradas as incertezas no processo de medição dos sensores utilizados, que podem ser decorrentes de falhas mecânicas ou obstruções por resíduos, entre outros fatores que comprometem a precisão dos dados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estabelecer uma boa relação chuva-vazão é um processo desafiador, devido à complexidade dos processos hidrológicos. No caso específico da Bacia Hidrográfica Urbana Experimental do Canalete da Argolo, que demandou todas as etapas necessárias, desde a aquisição e tratamento dos dados até a aplicação no modelo, esse desafio torna-se ainda mais significativo. Ainda assim, os resultados obtidos até o momento são promissores e demonstram que o modelo desenvolvido apresenta bom desempenho na simulação da transformação chuva-vazão, cumprindo seu papel como ferramenta de apoio no enfrentamento de inundações urbanas.

Por se tratar de um monitoramento recente, com poucos eventos registrados, especialmente de chuvas extremas, recomenda-se que novas simulações sejam realizadas à medida que mais dados forem coletados, além da utilização de dados de vazão mais precisos. Dessa forma, considerando o aumento da frequência de eventos extremos, o modelo poderá ser continuamente aprimorado, consolidando-se como uma ferramenta essencial para apoiar órgãos gestores na formulação de políticas públicas e na implementação de medidas que promovam a resiliência das cidades. Entre essas medidas, destaca-se o desenvolvimento de sistemas de alerta antecipado, baseados na estimativa da cota máxima a partir da previsão de precipitação, contribuindo para a mitigação dos impactos causados por inundações.

REFERÊNCIAS

- BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMA, N. B.; MENDIONDO, E. M. (2015) *Review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects*. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, Beijing, Vol. 8, Nº 3.
- CANHOLI, A. P. (2015). *Drenagem urbana e controle de enchentes*. v. 2. São Paulo: Oficina de Textos.
- CARTER, R. W. (1961). *Magnitude and frequency of flood in suburban areas*. U. S. Geological Survey, Prof. Paper 424-B, B9-B11.
- CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO, C. R. S. (2006). *Solos e terras do planalto sul-rio-grandense e planícies costeiras*. Circular técnica 55. Pelotas: CPACT-EMBRAPA.
- FARACO, C. (2015). *Em quatro horas, chuva em Pelotas atinge o esperado para todo o mês*. GZH – Gaúcha Zero Hora, 20 set. 2015. GZH Geral. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2015/02/em-quatro-horas-chuva-em-pelotas-atinge-o-esperado-para-todo-o-mes-cj5vvfils0x3nxbj021rcjqu3.html>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- FELTEN, M. O. (2023). *Modelagem hidrológica em Bacia Hidrográfica Urbana Experimental do Canalete da Argolo, Pelotas-RS*. 2023. 75f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Hídrica). Universidade Federal de Pelotas.

- FELTEN, M. O., et al. (2023). *Bacia Hidrográfica Urbana Experimental Do Canaleta Da Argolo, Pelotas-Rs – O Início Do Monitoramento Hidrológico*. Congresso de Iniciação Científica, 32, 2023. Anais [...]. Pelotas: UFPel.
- GUPTA, RAM S. (2008). *Hydrology and hydraulic systems*. 3a ed. Editora Waveland, 896 pag. ISBN 1-57766-455-8.
- Leite, L. S. (2024). *Estabelecimento de uma Bacia Hidrográfica Urbana Experimental em Pelotas/RS: Monitoramento hidrológico e inventário das estruturas de drenagem em ambiente SIG*. 2024. Dissertação de Mestrado (Mestre em Recursos Hídricos). Universidade Federal de Pelotas.
- MORIASI, D. N.; et al. *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. Transactions of the ASABE, v. 50, n. 3, 2007.
- OSMAN, S; ABUSTAN, I. (2012). Estimating the Clark Instantaneous Unit Hydrograph parameters for selected gauged catchments in the west Coast of Peninsular Malaysia. *ASEAN Engineering Journal*, v. 1, n. 3, p. 126-141.
- PAULINO, P. F. (2014). *Estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros do método SCS na determinação de hidrogramas de cheia em bacias urbanas*. 2014. 128 f. Tese de Doutorado (Mestre em ciências: engenharia hidráulica e saneamento). Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo.
- PROJETO CHOVE CHUVA. (2013). *Sem querer fui me lembrar de uma rua e seu canaleta*. Blog Projeto Chove Chuva. Pelotas, 2013. Disponível em: <http://projetochovechuva.blogspot.com/2013/02/sem-querer-fui-me-lembrar-de-uma-rua-e.html>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- SANTOS, M. S. (2021). *Gestão participativa em bacia hidrográfica urbana com carência de dados - dificuldades e alternativas com modelagem, sensoriamento remoto e observação de baixo custo para melhoria da drenagem urbana*. 2021. 158f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Hídrica). Universidade Federal de Pelotas.
- SCHAAKE, J. C.; GEYER, J. C.; KNAPP, J. W. (1967). *Experimental examination of the rational method*. Journal of Hydraulics Division, ASCE, vol. 93, No. HY6, p 353-370.
- SILVEIRA, A. L. L. (2005). *Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, RS: ABRH. Vol. 10, n. 1, p. 5-23.
- SOARES, P. R. R. (2001). *Modernidade urbana e denominação da natureza: o saneamento de Pelotas nas primeiras décadas do século XX*. História em Revista. Pelotas.
- STEINMETZ, A. A., DE OLIVEIRA, V. A., BRESSIANI, D. D. A., & BESKOW, S. (2019). *Simulação Hidrológica Pelo Modelo SWAT Para Uma Bacia Hidrográfica No Bioma Pampa*. 5º Semana Integrada UFPel. XXI Encontro de Pós-Graduação.
- TUCCI, C. E. M. 1993. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4 ed 7ª reimp. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2015.
- USACE - U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. (2015). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Applications Guide and Quick Start Guide*. Davis: US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 169p.
- USACE - U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. (2000) *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual*. Davis: US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 148p.
- VIEIRA, A. B. (2020). *Etnografia e Diagnóstico socioambientais na Colônia Z3 contribuições para a gestão de recursos hídricos na cidade de Pelotas/RS*. Dez 2020. Dissertação – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. YUAN, Wenlin; LIU, Meiqi; WAN, Fang. *Calculation of critical rainfall for small-watershed flash floods based on the HEC-HMS hydrological model*. Water Resources Management, v. 33, p. 2555-2575, 2019.

AGRADECIMENTOS – A Universidade de São Paulo; a CAPES em específico ao Programa de Excelência Acadêmica; a FAPESP; a Universidade Federal de Pelotas e ao curso de Engenharia Hídrica; ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC/CNPq pela bolsa de iniciação científica da primeira autora; à FAPERGS pelo apoio ao projeto 23/2551-0000785-1; e ao CNPq pelo projeto 409197/2021-1; e ao SANEP (Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas).