

ANÁLISE DA ENCHENTE DE 2024 NO RIO PARDINHO: APLICAÇÃO DO HEC-RAS NA MODELAGEM HIDRÁULICA

Amanda Peres Leite¹; Andréa Souza Castro¹; Francisco F. N. Marcuzzo²; Diuliana Leandro¹;

Camila Dalla Porta Mattiuzi²

Abstract: This study analyzed the flood discharges of the Pardinho River, in the municipality of Santa Cruz do Sul, for different return periods, using as a reference the maximum water level recorded during the May 2024 flood in the state of Rio Grande do Sul. For this purpose, the highest annual water levels from 1982 to 2023 were compiled and validated, based on data from the Santa Cruz – Montante streamflow gauge station (code 85830000), operated by the Brazilian Geological Survey. The corresponding discharges were estimated using the power equation of the station's rating curve, with extrapolation required only for the water level observed in May 2024. After adjustments, a discharge of 261.1 m³/s was adopted as representative of the 2024 extreme event. This discharge series was used in the SEAF software to determine the discharges associated with return periods of 2, 5, 10, 50, 100, 200, and 1000 years. The resulting discharges were used to generate flood inundation maps in the urban area of the municipality through hydraulic simulations in the HEC-RAS software, considering steady and uniform flow. The results indicated similarities among the flood inundation maps generated for the different return periods, suggesting the need for refinement in the calibration of the hydrological model. However, it was observed that the inundation map simulated for the 2-year return period showed notable correspondence with the actual overflow scenario of the Pardinho River during the May 2024 flood.

Resumo: Este estudo analisou as vazões de cheia do rio Pardinho, no município de Santa Cruz do Sul/RS, para diferentes tempos de retorno, tomando como referência a cota máxima registrada durante a enchente de maio de 2024, no estado do Rio Grande do Sul. Para isso, foram compiladas e validadas as maiores cotas anuais de 1982 a 2023, a partir dos dados da estação fluviométrica Santa Cruz – Montante (código 85830000), operada pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB). As vazões correspondentes foram estimadas por meio da equação potencial da curva-chave da estação, sendo necessária extrapolação apenas para a cota observada em maio de 2024. Após ajustes, foi adotada uma vazão de 261,1 m³/s como representativa do evento extremo de 2024. Essa série de vazões foi inserida no software SEAF para a determinação das vazões associadas aos tempos de retorno de 2, 5, 10, 50, 100, 200 e 1000 anos. As vazões resultantes foram utilizadas na geração das manchas de inundação na área urbana do município, por meio de simulações hidráulicas no software HEC-RAS, considerando escoamento permanente e uniforme. Os resultados indicaram semelhanças significativas entre as manchas de inundação geradas para os diferentes tempos de retorno, sugerindo a necessidade de refinamento na calibração do modelo hidrológico. No entanto, observou-se que a mancha de inundação simulada para o tempo de retorno de 2 anos apresentou notável correspondência com o cenário real de extravasamento do rio Pardinho durante a cheia de maio de 2024.

Palavras-Chave – Manchas de inundação; Tempo de retorno; Vazões.

INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada e desordenada altera significativamente o uso do solo, ao remover a vegetação original, aumentar a impermeabilização e introduzir obras de canalização. Associada à ocupação de áreas irregulares, como as várzeas, essa dinâmica intensifica a ocorrência de inundações

1) UFPEl – Universidade Federal de Pelotas - Praça Domingos Rodrigues – Centro – Pelotas/RS – CEP 96.010-450, Tel.: (53) 3284-1700. amanda.peresl@hotmail.com; andreascastro@gmail.com; diuliana.leandro@gmail.com

2) SGB - Serviço Geológico do Brasil - Rua Banco da Província, 105 - Santa Teresa - Porto Alegre/RS - CEP 90.840-030, Tel.: (51) 3406-7300. francisco.marcuzzo@sgb.gov.br; camila.mattiuzi@sgb.gov.br

(Miguez, 2015; Tucci, 2007). A cheia de maio de 2024 no Rio Grande do Sul foi marcada por chuvas intensas e volumosas em curto período e ampla área, gerando graves impactos socioeconômicos e ambientais (Paiva *et al.*, 2024). Em Santa Cruz do Sul, setores até então não afetados, como a rodoviária e áreas a leste da BR-471, também foram inundados. A partir dos estudos publicados por Peixoto e Lamberty (2016) e Menezes (2014), constatou-se que Santa Cruz do Sul possui um longo histórico de eventos de inundações, causando prejuízos sociais e econômicos para a população e o município. Menezes (2014) relatou 33 registros de inundações durante o período entre 1980 e 2013, enquanto Peixoto e Lamberty (2016) apontaram, no mínimo, a ocorrência de um evento de inundação no município entre os anos de 2011 e 2015. Nesse contexto, estudos relacionados a aplicação de modelos hidráulicos computacionais que permitam a simulação e modelagem de eventos de inundação são ferramenta imprescindível, para o planejamento urbano e o monitoramento e mapeamento de áreas de risco (Ribeiro e Lima, 2011). Na modelagem de inundações, um dos softwares utilizados é o modelo computacional *Hydrologic Engineering Center – River Analysis System* (HEC-HAS), que permite analisar a extensão, a profundidade e a velocidade da inundação (Lima *et al.*, 2024).

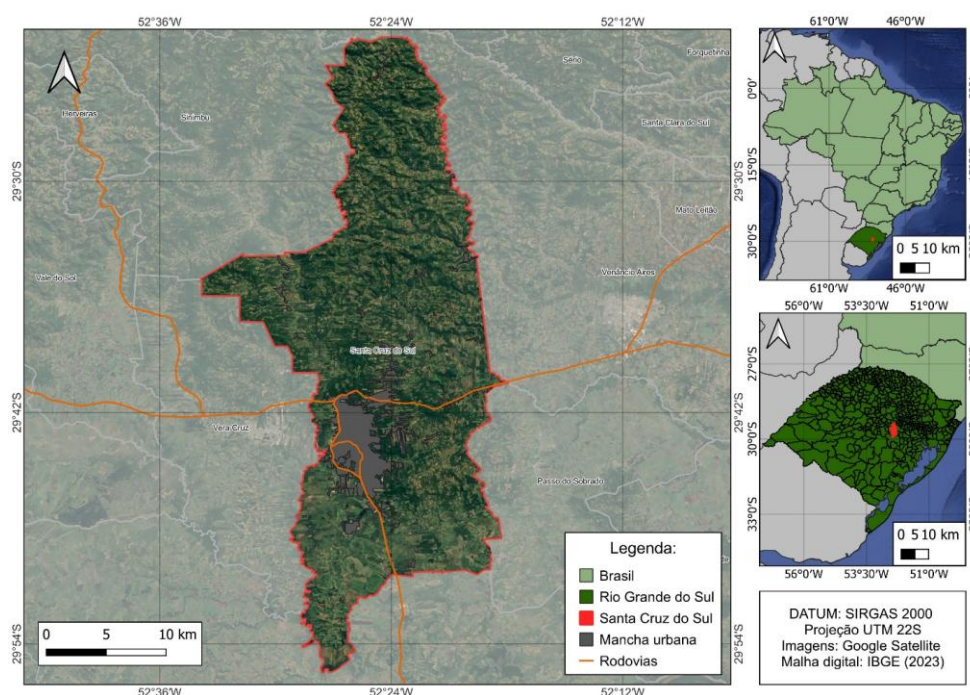
Assim, este estudo propõe a realização de simulações hidráulicas no software HEC-RAS, com o objetivo de gerar manchas de inundação associadas a diferentes tempos de retorno. A área de estudo abrange o trecho do rio Pardiniho que atravessa a zona urbana de Santa Cruz do Sul, tomando como referência a maior cota registrada durante a enchente de maio de 2024, no estado do Rio Grande do Sul. A acurácia dos resultados foi avaliada por meio da comparação com estudos prévios e com as áreas efetivamente alagadas durante o referido evento.

METODOLOGIA

Área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Santa Cruz do Sul (Figura 1), na encosta inferior do nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, a aproximadamente 150 km de Porto Alegre.

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.



A cidade está posicionada à margem esquerda do rio Pardiniho, enquanto a margem direita pertence ao município de Vera Cruz. A região limita-se com os municípios de Vera Cruz a leste, Rio

Pardo ao sul, Sinimbu ao noroeste, Venâncio Aires ao nordeste e Passo do Sobrado a leste. A Figura 1 apresenta a localização da cidade. Segundo IBGE (2022), o município tem uma área de 734,516 km², sendo 156,96 km² de área urbana e está posicionado em torno das coordenadas geográficas 29°43'59" de Latitude Sul e 52°24'52" de Longitude Oeste.

Levantamento das cotas

Inicialmente, foi determinado o maior nível d'água atingido pelo rio Pardinho durante a cheia de maio de 2024, com base nas informações disponibilizadas na nota técnica de Marcuzzo *et al.* (2024). A adoção dessa metodologia justifica-se pelo fato de que os levantamentos dos níveis dos rios apresentados pelos autores foram realizados *in loco*, durante e após o evento, utilizando marcas de cheia como referência, o que confere maior confiabilidade aos dados obtidos. Verificou-se que, em Santa Cruz do Sul, apenas a estação fluviométrica Santa Cruz – Montante (código 85830000), localizada no rio Pardinho, possuía dados de cota nivelada referentes à cheia de maio de 2024. Durante o evento, essa estação registrou um nível máximo de 8,99 metros, superando a cota de inundação estabelecida para o local, de 7,20 metros.

A partir de dados fornecidos pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB), realizou-se o levantamento e a verificação das maiores cotas anuais registradas pela estação Santa Cruz – Montante até o ano de 2023. A consistência dos dados hidrológicos seguiu a metodologia proposta por Naitzel *et al.* (2020), complementada por uma análise comparativa dos cotogramas das estações fluviométricas de apoio: Candelária – Montante (85735000), situada no rio Pardo a montante da estação de interesse, e Rio Pardo (85900000), localizada no rio Jacuí, a jusante da mesma.

Vazão e tempo de retorno

A curva-chave é uma ferramenta criada para determinar os valores de vazão a partir do nível d'água numa dada seção de um rio (Sefione, 2002). Uma das formas para determinar a vazão pelo método da curva-chave é a utilização da Equação 1 em forma de potência, onde a e n são constantes determinadas para cada local, H é a cota referente a uma vazão Q , e H_0 é a cota referente a vazão nula.

$$Q = a * (H - H_0)^n \quad (1)$$

Assim, as vazões utilizadas no presente trabalho foram calculadas com base nas equações das curvas-chave de potência definidas para a estação fluviométrica Santa Cruz Montante. As curvas de descarga foram obtidas com o SGB/SUREG-PA e estão disponíveis através da plataforma HIDROWEB (ANA, 2024), conforme apresentado na Tabela 1, que reúne apenas as equações aplicadas neste estudo.

Tabela 1 – Curvas de descarga da estação Santa Cruz Montante utilizadas neste estudo.

Início	Fim	Cota mínima (m)	Cota máxima (m)	a	H_0	n
07/06/1981	24/05/1984	5,42	7,5	14,1726	2,77	1,85
24/06/1988	08/07/2003	6,07	7,5	14,1726	2,77	1,85
09/07/2003	20/09/2012	6,2	7,5	14,1726	2,77	1,85
21/09/2012	21/10/2016	6,2	7,5	14,1726	2,77	1,85
22/10/2016	31/12/2023	6,2	7,5	14,1726	2,77	1,85
01/01/2024	31/12/2024	6,2	7,5	14,1726	2,77	1,85

Fonte: Adaptado SGB/SUREG-PA.

O nível do rio inserido nas equações corresponde aos dados levantados das maiores cotas anuais da estação, obedecendo o intervalo de tempo e de cota para cada curva. Optou-se por adotar essa metodologia pois, até o presente momento, não há registros de vazão durante a cheia de maio de 2024 no rio Pardinho dentro do limite municipal de Santa Cruz do Sul.

A série de vazões gerada foi inserida no software SEAF – Sistema Especialista de Análise de Frequência (Cândido, 2003) para calcular vazões associadas aos tempos de retorno de 2, 5, 10, 50, 100, 200 e 1000 anos. Porém, devido a cota registrada no evento de maio ser superior a cota máxima da curva correspondente, foi necessário recorrer a extrapolação da curva-chave para a cota de 2024.

A extrapolação de curvas-chave não se resume à simples extensão do tramo superior, embora essa prática possa ser adotada em situações específicas (Dias *et al.*, 2019). Nessas circunstâncias, as extrapolações tendem a apresentar maior magnitude em relação às interpolações, o que acarreta níveis mais elevados de incerteza e pode comprometer a confiabilidade das estimativas de vazão na faixa extrapolada (Sefione, 2002). Assim, persistem incertezas e ambiguidades inerentes ao processo de extrapolação das curvas de descarga (Filho *et al.*, 2003).

Adicionalmente, um dos principais desafios relacionados à extrapolação das curvas de descarga de 2024 reside no fato de que, conforme informado pelo SGB/SUREG-PA, os dados utilizados neste estudo foram disponibilizados antes da atualização das curvas-chave levando em consideração os dados recentes do evento de maio de 2024. Isso implica que ainda não passaram por validação formal, podendo, portanto, não refletir com precisão os valores associados ao evento extremo de maio de 2024.

Diante desse cenário, buscou-se minimizar possíveis distorções na inserção da vazão extrapolada no sistema SEAF por meio da testagem de diferentes valores inferiores ao inicialmente estimado. O objetivo foi identificar o maior valor compatível com os critérios estatísticos exigidos pelo sistema, sem a geração de outliers. A distribuição final adotada foi aquela que apresentou melhor desempenho nos testes de ajuste, assegurando maior confiabilidade aos resultados obtidos.

Modelo Digital de Terreno (MDT)

Empregou-se MDT urbano com resolução de 1 metro fornecido pela Secretaria Municipal de Planejamento e Governança (SEPLAG) de Santa Cruz do Sul e MDT Copernicus (30 m) para a margem direita. Ressalta-se que a combinação dessas bases decorre da indisponibilidade de dados altimétricos de alta resolução e abrangência para toda a área de estudo. Embora o ideal seja um MDT homogêneo e preciso, a integração dos dados existentes representou a solução tecnicamente viável diante das restrições, permitindo avançar na modelagem e identificação preliminar das áreas críticas.

Calibração e validação do modelo

No menu RAS Mapper, foi definida a geometria do rio Pardinho, que consistiu em desenhar linhas representativas do trecho do rio, linhas de margem, caminhos de fluxo da água sobre o terreno e seções perpendiculares ao rio (seções transversais). Ressalta-se que os traçados verticais foram realizados de montante a jusante, e os horizontais desenhados da margem esquerda para a margem direita do rio Pardinho. Destaca-se que não foi seguido um padrão específico para o traçado das seções transversais. Priorizou-se a criação de mais seções em trechos com mudanças significativas no rio, como curvas e em áreas próximas às zonas urbanas, visando maior detalhamento nessas regiões. Além disso, foram feitas seções imediatamente antes e depois de pontes e passarelas. No total, foram feitas 73 seções transversais perpendiculares a geometria traçada para o rio Pardinho.

As vazões calculadas para cada tempo de retorno dentro do sistema SEAF foram inseridas no HEC-RAS no menu Steady Flow. A condição de contorno adotada, tanto a montante quanto a jusante, foi a de profundidade normal. Neste processo, o programa exige a inserção da declividade da linha d'água, então, a partir da geometria do traçado do rio Pardinho feito no RAS Mapper, determinou-se

o comprimento do trecho e as elevações de montante e jusante. Dessa forma, a declividade foi calculada dividindo a diferença entre a elevação de montante e jusante pelo comprimento total do rio. O coeficiente de Manning para toda a extensão do rio também foi definido e inserido nesta etapa. Após a inserção todos esses dados de entrada e a definição das condições de contorno, realizou-se a simulação hidráulica para escoamento permanente e uniforme.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Vazões inseridas no modelo

A Tabela 2 apresenta o resultado do levantamento das maiores cotas anuais consistidas e as vazões calculadas para cada cota de acordo com a curva de descarga da estação Santa Cruz Montante.

Tabela 2 – Levantamento das maiores cotas anuais e vazões calculadas

Ano	Data	Cota (m)	Vazão calculada (m ³ /s)	Ano	Data	Cota (m)	Vazão calculada (m ³ /s)
1982	15/jun	6,88	193,7	2007	23/set	7,24	226,2
1988	26/set	6,99	203,4	2008	26/out	7,24	226,2
1989	12/set	7,00	204,6	2009	08/nov	7,30	231,9
1990	12/out	7,10	213,6	2010	05/jan	7,36	237,6
1993	14/mai	7,10	213,6	2011	09/ago	7,28	230,0
1994	22/abr	7,32	233,8	2012	19/set	7,28	230,0
1995	14/fev	7,12	215,1	2013	25/ago	7,30	231,9
1996	26/jan	7,10	213,3	2014	29/jun	7,34	235,7
1997	05/out	7,14	216,9	2015	20/jul	7,35	236,6
1998	07/jan	7,14	217,0	2016	18/out	7,30	231,9
1999	29/mai	7,10	213,3	2017	08/jun	7,40	241,4
2000	13/out	7,18	220,6	2018	24/nov	7,42	243,4
2001	01/out	7,22	224,3	2019	24/jul	7,40	241,4
2002	10/jun	7,20	222,5	2020	08/jul	7,38	239,5
2003	09/jul	7,24	226,2	2021	27/jun	7,30	231,9
2004	11/jun	7,18	220,6	2022	23/jun	7,30	231,9
2005	08/out	7,18	220,6	2023	08/jul	7,40	241,4
2006	45865	7,08	211,5	2024	maio	8,99	416,8

Ressalta-se que a série histórica da estação Santa Cruz – Montante apresenta uma lacuna de dados no período de janeiro de 1983 a dezembro de 1987, em função da ausência de observador e de registros oficiais no período, conforme informações do SGB/SUREG-PA. Considerando o intervalo total de dados analisados (1982–2023), a ausência desse subperíodo representa uma limitação, porém com impacto estatístico considerado reduzido na composição da série, dado o número total de anos com registros válidos (n=40). Além disso, o uso de técnicas de consistência de dados e de complementação por estações de apoio permitiu atenuar eventuais distorções na estimativa das vazões associadas aos tempos de retorno.

Em relação a vazão do ano de 2024, seguindo o método da extrapolação da curva-chave, foi obtido um valor de 416,8 m³/s. Porém, notou-se que ao inserir a série de vazões com esse dado no SEAF, os resultados das vazões para os diferentes tempos de retorno eram insatisfatórios devido a inclusão do elevado resultado oriundo da extrapolação da curva de descarga.

Feliciano (2022) e Campos (2022) também utilizaram o software SEAF para o cálculo dos tempos de retorno. Em ambos os estudos, o critério principal para selecionar a distribuição mais adequada foi verificar qual delas apresentava um valor de $R > R(90\%)$ no teste de Filiben e, ao mesmo tempo, possuía o menor valor absoluto de $|Z|$. Seguindo a mesma metodologia, observou-se que ao inserir a série de vazões com a vazão calculada para o ano de 2024 no software SEAF foi detectado outliers e resultados insatisfatórios nos testes de ajuste do programa.

Dessa forma, a vazão de 2024 foi substituída por valores inferiores a 416,8 m³/s na série de vazões inserida no SEAF. Essa substituição foi realizada progressivamente até se obter um valor máximo que gerasse resultados satisfatórios no software para os testes de ajuste e que, também, não configurasse um outlier na série. Assim, a maior vazão possível para o ano de 2024 que não apresentou inconsistências estatísticas no sistema foi de 261,2 m³/s, uma vez que não foram detectados outliers na série inserida e que há distribuições em que $R > R(90\%)$.

Aplicando essa correção no SEAF, adotou-se os resultados da distribuição Pearson-III, pois foi o que apresentou melhores resultados por exibir o menor valor de $|Z|$ dentre as demais séries. No teste de Filliben, essa distribuição apresentou $R = 0,9869$ e $R(90\%) = 0,9821$, satisfazendo a condição $R > R(90\%)$. A Tabela 3 apresenta esse conjunto de vazões associadas aos tempos de retorno distintos, os quais posteriormente foram inseridos no modelo HEC-RAS para a elaboração das manchas.

Tabela 3 – Vazões associadas a diferentes tempos de retorno aplicadas na modelagem hidráulica

Tempo de retorno	Vazão (m ³ /s)
2	226,3
5	237,3
10	242,9
50	252,1
100	255,3
200	258,1
1000	263,8

É importante destacar que a vazão máxima registrada na estação fluviométrica Santa Cruz Montante foi de 241 m³/s, no dia 19 de setembro de 2023, valor que se relaciona com a vazão obtida para o tempo de retorno (TR) de dez anos. Em relação aos tempos de retorno anteriores, constatou-se que a vazão de 226 m³/s, correspondente ao TR 2, foi registrada no dia 9 de agosto de 2011, associada a uma cota de 7,28 metros. Já para o TR 5, identificou-se uma vazão de 237 m³/s no dia 8 de julho de 2020, relacionada a uma cota de 7,38 metros.

Modelo hidráulico

O coeficiente de Manning foi estabelecido com base em Chow (1959), uma referência amplamente utilizada em estudos de inundações, considerando o uso e a ocupação do solo. O coeficiente de rugosidade utilizado na simulação hidráulica no software HEC-RAS ao longo do rio

Pardinho, em regime de escoamento uniforme, foi de 0,0851. Ressalta-se que o valor calculado é semelhante ao encontrado por Monte *et al.* (2019).

A resolução do arquivo de terreno nas áreas referentes a calha do leito do rio Pardinho é de qualidade mediana devido ao processamento de mesclagem que o MDT foi submetido. Por isso, há algumas incoerências na topografia relacionadas a picos não condizentes com a realidade na margem direita do rio. Para minimizar esses efeitos, cada uma das 72 seções transversais desenhadas foi analisada, permitindo a identificação e remoção dessas inconsistências.

Em relação à declividade, observou-se que a elevação de montante do rio era de 39,22 metros, a de jusante, 22,80 metros, e o comprimento total do rio, 21.418,27 metros. Com base nesses dados, a declividade foi calculada em 0,0007 m/m. Essa informação foi inserida no menu Steady Flow para a condição de profundidade normal e aplicada a todas as vazões calculadas para cada tempo de retorno. Logo, para este trabalho foi considerado um regime de escoamento permanente e uniforme.

Mapeamento das áreas inundadas

Observou-se que as manchas de inundação geradas para todos os tempos de retorno calculados apresentaram resultados muito semelhantes entre si. A Figura 2 evidencia essa situação através da comparação entre as manchas obtidas para o TR 2 e o TR 1000. Todas as manchas de inundações para cada tempo de retorno podem ser acessadas nos links descritos na Tabela 4.

Figura 2 – Comparação entre as manchas de inundação obtidas para o TR 2 e o TR 1000

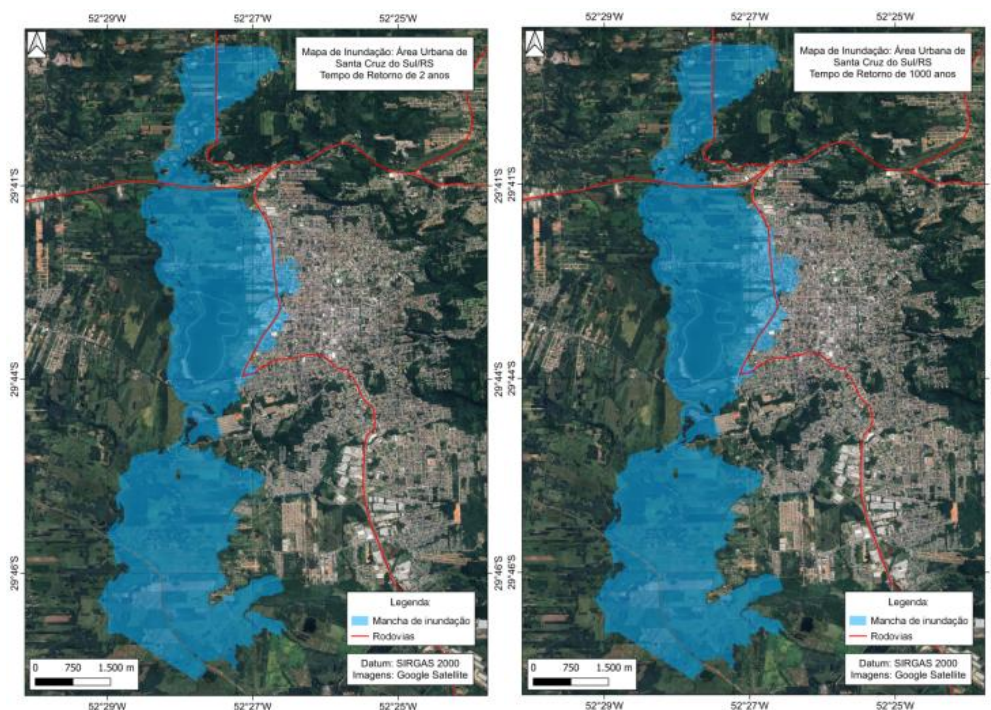


Tabela 4 – Links de acesso para as manchas de inundação geradas para cada tempo de retorno.

Formato	Link
PDF	https://1drv.ms/f/c/0a77db4f8aaea244/EmRQbgE-kWpOgL0dNpPCK2cBLZUawzKJlqgOgNEGaz2VQ
PNG (300 dpi)	https://1drv.ms/f/c/0a77db4f8aaea244/EgDmHNYibuRMkze41EO0XbABpuUOjRi39cxvra8FyQ9uxA
KML	https://1drv.ms/f/c/0a77db4f8aaea244/Em5HFcPk_rFNlC9uVO6wtoIBJECTcHtmDnL0A584AuwkMQ

Essa ausência de variação de área significativa pode ser explicada pelo fato de que a vazão simulada para o tempo de retorno de 2 anos já está associada à cota de extravasamento do rio, além da pequena diferença de apenas 37,5 m³/s entre as vazões correspondentes aos tempos de retorno de 2 e 1000 anos. Logo, com base nesses resultados obtidos, foi possível identificar a formação de zonas urbanas inundadas para todos os cenários simulados. Isso justifica o histórico da região, que frequentemente sofre com o transbordamento do canal, gerando inundação nas áreas urbanas.

Também fazem parte das áreas atingidas pelas manchas de inundação as ruas do bairro Várzea, que, segundo a Universidade de Santa Cruz do Sul (2018), sofreram eventos de inundação de forma recorrente entre os anos de 2010 e 2017. Logo, é possível observar que o modelo apresentou certa precisão em relação as localidades que podem ser consideradas críticas.

Monte *et al.* (2019) nos mostram uma mancha de inundação obtida pelo HEC-RAS para a área urbana de Santa Cruz do Sul durante o evento da cheia de julho de 2015, no qual foi usada como referência a cota de inundação de 7,26 metros. A partir dos dados disponibilizados pelo SGB/SUREG-PA, foi verificado que a cota de 7,26 metros ocorreu no dia 13 de julho de 2015 e é associada a uma vazão de 228 m³/s. O resultado obtido por Monte *et al.* (2019) foi comparado com a mancha gerada para a vazão do TR 2, que foi um cenário simulado para uma vazão de 226,36 m³/s.

Nota-se diferença entre os dois resultados, pois não é detectado em nenhum ponto que a mancha de inundação gerada por Monte *et al.* (2019) ultrapassa a BR-471, que atua com um dique, diferente da mancha apresentada para o TR 2 neste trabalho, que ultrapassa a BR-471 em diversos pontos diferentes. Ressalta-se que a metodologia seguida pelos autores diverge da metodologia seguida deste trabalho, pois Monte *et al.* (2019) adotaram regime de escoamento não permanente, os coeficientes de Manning foram atribuídos de acordo com a classificação do solo e foram adicionadas seções topobatimétricas no rio Pardinho, além de outras diferenças.

É importante ressaltar que ao analisar fenômenos extremos, como cheias e secas, o uso do modelo de escoamento permanente tende a resultar em valores majorados, uma vez que esse método adota como parâmetro de entrada a vazão máxima ou mínima observada na região. Conforme discutido por Chow *et al.* (1988), essa abordagem simplifica as condições hidrológicas, assumindo um estado estável e extremo, o que pode superestimar os resultados. No entanto, como destacado por Tucci (1998), essa superestimação é intencional e age a favor da segurança.

Menezes (2014) retrata em seu trabalho o zoneamento das áreas de risco de inundação na área urbana de Santa Cruz do Sul. Constatou-se que grande parte da porção a oeste da BR-471 é classificada como áreas susceptíveis a inundação, resultado condizente com as manchas de inundações simuladas para todos os tempos de retorno deste trabalho. Segundo o autor, os bairros situados a leste da rodovia também possuem áreas de risco de inundação, mas as manchas não são tão expressivas quanto como ocorre na parte oeste da rodovia devido ao seu comportamento semelhante a um dique. Porém, as manchas feitas por Menezes (2014) nos bairros situados na porção leste da BR-471, abrangem mais áreas do que as simuladas para este estudo. Isso ocorre porque no estudo de Menezes (2014) é considerada toda a hidrografia da cidade, diferente deste estudo que considerou apenas o rio Pardinho.

Em relação ao evento de maio de 2024, análises comparativas foram feitas para identificar a semelhança entre as reais áreas atingidas durante o evento e as áreas alagadas para cada tempo de retorno simuladas no HEC-RAS. Como as manchas para cada TR apresentaram resultados parecidos, usou-se para fins comparativos apenas a mancha de inundação para o tempo de retorno de 2 anos. Dessa forma, a primeira análise consistiu em identificar as ruas do município atingidas, com base na planilha de unidades atingidas disponível no site da Defesa Civil de Santa Cruz do Sul (2024). Notou-se que a mancha gerada para o TR 2 coincidiu com diversos pontos atingidos sinalizados na planilha, como por exemplo as ruas Félix Hoppe, Santo Antônio e as ruas do bairro Várzea.

A segunda análise foi feita baseada nas notícias divulgadas por diversos canais de comunicação sobre a cheia, como entrevistas com moradores e fotos das ruas atingidas. Uma das notícias, publicada por Cruz e Wachholtz (2024), retrata imagens da rodoviária de Santa Cruz do Sul após rebaixamento do nível d'água, mostrando as marcas de sujeira deixada pela enchente. Os autores também destacaram que, segundo relatos dos moradores da região, esta foi a primeira vez que a rodoviária foi atingida por uma enchente. A níveis de comparação, constatou-se que mancha de inundação simulada para o TR 2 também englobou a rodoviária do município.

CONCLUSÃO

As vazões obtidas pela curva-chave são satisfatórias, com exceção do ano de 2024, em que foi necessário minorar o valor calculado para não gerar erros estatísticos nos cálculos do tempo de retorno. Essa correção permitiu estimar uma vazão mais compatível com a cota registrada durante a cheia de maio de 2024 no rio Pardinho, porém, não há dados e nem equações de curva de descarga atualizadas que valide esse resultado, ressaltando a importância do ajuste da maior vazão ocorrida em 2024 nos cálculos do tempo de retorno para estudos posteriores.

Com relação às simulações realizadas no HEC-RAS, observou-se que as manchas de inundação obtidas parecem refletir mais o cenário do transbordamento da calha do rio Pardinho durante a cheia de maio de 2024 do que representar eventos de diferentes magnitudes associados a cada tempo de retorno. Recomenda-se, para estudos futuros, a incorporação de bases altimétricas mais homogêneas e de alta precisão, bem como a utilização de modelagem não permanente, que permitiria melhor representação das dinâmicas hidrológicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Serviço Geológico do Brasil (SGB), em especial à Superintendência Regional de Porto Alegre (SUREG/PA), e à Secretaria Municipal de Planejamento e Governança (SEPLAG) de Santa Cruz do Sul, pelo apoio institucional e pelas informações técnicas disponibilizadas, fundamentais para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS e SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em 2024
- CAMPOS, A. F. S. (2022). *“Simulação no software HEC-RAS da mancha de inundação do rio Itabirito na cidade de Itabirito – MG para diferentes períodos de retorno”*. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 62.
- CÂNDIDO, M. de O. (2003). *“SEAF – Sistema Especialista de Análise de Frequência”*.
- CHOW, V.T. (1959). *Open Channel Hydraulics*.
- CHOW, V. T. et al. (1988). *Applied Hydrology*.
- CRUZ, M. da; WACHHOLTZ, E (2024). *“Imagens: marca de sujeira mostra até onde enchente chegou na rodoviária de Santa Cruz”*. Portal Ar Auto, Santa Cruz do Sul, 1 maio 2024.
- DEFESA CIVIL DE SANTA CRUZ DO SUL (2024). *“Imóveis atingidos em 2024”*. Santa Cruz do Sul.
- Dias, L. C. et al. (2020). *“Elaboração e Extrapolação de Curvas-chave na Região Amazônica”*. Revista Brasileira De Geografia Física, 12(6), 2285–2301.

- FELICIANO, F. C. S. (2022). *“Modelagem hidrodinâmica e mapeamento de áreas de inundação urbana do município de Rio Piracicaba/MG”*. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 70.
- Filho, D. P. et al. (2003). *“Sistema de ajuste e extrapolação de curva de descarga – STEVENS”*.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. (2022). *“Censo Demográfico 2022”*. Rio de Janeiro: IBGE.
- LIMA, R. P. C. et al. (2024). *“Simulação de áreas de inundação no município de Ponte Nova – MG utilizando modelagem hidrodinâmica”*. Geoambiente On-line, Goiânia, n. 50, 2024.
- MARCUZZO, F. F. N. et al. (2024). *“Nota Técnica: aferição direta e avaliação indireta do nível máximo de rios em estações fluviométricas e marcas de inundação no Rio Grande do Sul na grande cheia de maio de 2024.”* 9ª versão. Porto Alegre: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2024.
- MENEZES, D. J. (2014). *“Zoneamento das áreas de risco de inundação na área urbana de Santa Cruz do Sul – RS.”*. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- MIGUEZ, M. (2015). *“Drenagem Urbana - Do Projeto Tradicional à Sustentabilidade”*. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2015. E-book.
- MONTE, B. E. O. et al. (2019). *“Capacidade do modelo HAND na representação de uma mancha de inundação comparado ao modelo hidrodinâmico HEC-RAS 2D.”*. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2019, Foz do Iguaçu. Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2019. Porto Alegre: ABRHidro, 2019.
- NAITZEL, L. et al. (2020). *“Recuperação de dados históricos da rede de referência e dos sistemas de alerta do rio Caí, Taquari e Uruguai”*. In: XV SRHNE - SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2020, Caruaru. Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017. Porto Alegre: ABRHidro.
- PAIVA, R. et al. (2024). *“Nota Técnica - Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática: Chuvas e cheias extremas na Região Sul do Brasil”*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- PEIXOTO, C. A. B.; LAMBERTY, D. (2016). *“Ação emergencial para reconhecimento de áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massa, enchente e inundação: Santa Cruz do Sul, Rio Grande do Sul”*. Porto Alegre: CPRM.
- RIBEIRO, C. B. M. de; LIMA, R. N. S. de. (2011). *“Modelagem hidrológica e hidráulica para simulação de inundações em uma bacia hidrográfica na área urbana do município de Juiz de Fora – MG”*. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos hídricos, 2011, Maceió.
- SEFIONE, A. L. (2002). *“Estudo comparativo de métodos de extrapolação superior de curvas-chave”*. 240 f. Tese (Mestrado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- TUCCI, C. E. M. (1998). *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: Editora da UFRGS.
- TUCCI, C. E. M. (2007). *Inundações Urbanas*. Porto Alegre: ABRH/RHAMA. 393 p.
- UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL. (2018). *“Sistema de Abastecimento de Água: Etapa III – Etapa Final do Plano Municipal de Saneamento Básico de Santa Cruz do Sul – RS”*. Santa Cruz do Sul: Pró-Reitoria de Extensão e Relações Comunitárias, Núcleo de Gestão Pública.