

AVALIAÇÃO DAS ZONAS DE ALTA VULNERABILIDADE A RISCOS HIDROLÓGICOS E A NECESSIDADE DE ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA EM PORTO ALEGRE/RS

Renan Sousa Vidal¹ ; Marina Batalini de Macedo²

RESUMO – Este estudo analisa a dinâmica de inundação e a vulnerabilidade urbana frente a eventos hidrológicos extremos no município de Porto Alegre ocorrido em maio de 2024. Através da modelagem hidrodinâmica espacializou-se a mancha de inundação para avaliar o comportamento do fluxo hídrico e delimitar zonas críticas. Os resultados evidenciam que a magnitude das inundações superou as cotas topográficas de segurança, provocando o colapso do sistema de proteção contra cheias da capital. Identificou-se o comprometimento integral de infraestruturas estratégicas, incluindo o complexo aeroportuário e os principais eixos rodoviários. A análise demonstra que a alta vulnerabilidade física resulta tanto da magnitude pluviométrica quanto da histórica ocupação urbana sobre planícies aluviais naturais. Conclui-se que os parâmetros de projeto vigentes, tais como tempo de retorno e vazão de projeto, estão defasados na medida em que resultam em infraestruturas incapazes de suportar a atual realidade climática. O diagnóstico cartográfico e quantitativo obtido fornece suporte científico essencial para o recálculo de cotas de projeto, reavaliação de riscos e implementação de novas diretrizes de planejamento urbano, com foco no aumento da resiliência e na adaptação climática.

Palavras-Chave – Inundação; Eventos extremos; Porto Alegre.

ABSTRACT – This study analyzes flood dynamics and urban vulnerability to the extreme hydrological events that occurred in the municipality of Porto Alegre in May 2024. Through hydrodynamic modeling, the flood extent was spatialized to evaluate the water flow behavior and delineate critical zones. The results evidence that the flood magnitude exceeded topographic safety levels, causing the collapse of the capital's flood protection system. The complete compromise of strategic infrastructures was identified, including the airport complex and the main road axes. The analysis demonstrates that the high physical vulnerability results from both the rainfall magnitude and the historical urban occupation over natural floodplains. It is concluded that current design parameters, such as return period and design flow, are outdated in that they result in infrastructure incapable of withstanding the current climate reality. The cartographic and quantitative diagnosis obtained provides essential scientific support for the recalculation of design elevations, risk re-evaluation, and the implementation of new urban planning guidelines, focusing on enhancing resilience and climate adaptation.

Key-words – Flood; Extreme events; Porto Alegre.

INTRODUÇÃO

As alterações climáticas representam um desafio global crescente, com consequências intensificadas em áreas urbanas devido à elevada densidade populacional e à predominância de

1) Afiliação: Universidade Federal de Itajubá, d2025100752@unifei.edu.br

2) Afiliação: Universidade Federal de Itajubá, marinamacedo@unifei.edu.br

superfícies impermeáveis (IPCC, 2023). A combinação do rápido crescimento populacional com a expansão urbana desordenada resulta em alagamentos, inundações e prejuízos econômicos significativos. Em Porto Alegre, este cenário atingiu um ponto crítico a partir de 29 de abril de 2024, quando eventos meteorológicos extremos levaram à decretação de estado de calamidade pública.

Os eventos hidrológicos extremos que assolaram o Rio Grande do Sul em 2024 corroboram a crescente influência das mudanças climáticas na dinâmica hídrica regional. As precipitações registradas resultaram em cheias históricas nas bacias dos rios Guaíba, Taquari e Jacuí, cujas vazões atingiram magnitudes próximas ou superiores aos valores de referência para segurança de barragens.

Nesse contexto, um estudo colaborativo internacional conduzido pela iniciativa World Weather Attribution (2024) investigou a causalidade desses eventos entre abril e maio de 2024. A análise concluiu que a mudança climática antropogênica alterou significativamente os padrões estatísticos da precipitação, tornando essas chuvas duas vezes mais prováveis e aumentando sua intensidade entre 6% e 9%. O estudo destacou ainda a contribuição determinante do fenômeno El Niño, evidenciando que a magnitude do desastre resultou da superposição crítica entre a variabilidade natural e o aquecimento global.

Projeções hidrológicas recentes delineiam os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos nacionais (ANA, 2024; Petry et al., 2025). Os estudos indicam que a Região Sul do Brasil apresenta o sinal mais evidente de agravamento dos eventos de cheia em decorrência do aquecimento global. Em escala nacional, o cenário projeta um aumento generalizado na ocorrência de precipitações intensas de curta duração (diárias). Essa alteração no regime pluvial eleva substancialmente o risco hidrológico, suscitando preocupações críticas quanto à intensificação de respostas rápidas em pequenas bacias e à recorrência de alagamentos em áreas urbanas.

Diante da não estacionariedade do clima, o uso de chuvas de projeto baseadas em séries históricas antigas, através das curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF), pode resultar no subdimensionamento de estruturas de drenagem. A obsolescência desses dados compromete a segurança hídrica, uma vez que não refletem o cenário atual de extremos climáticos. Portanto, a atualização periódica das curvas IDF, incorporando novos dados monitorados, é fundamental para adaptar a infraestrutura urbana e mitigar os impactos de chuvas intensas.

O desastre de 2024 expôs a vulnerabilidade da capital gaúcha, evidenciando o colapso do sistema de proteção contra cheias, a interrupção de serviços essenciais como abastecimento de água e saneamento, e o isolamento da cidade devido à interrupção de vias de acesso (IPEA, 2024). Cientificamente, a escolha deste tema justifica-se pela urgência em aumentar a resiliência urbana face à maior frequência e intensidade de precipitações extremas, ocasionadas pelas mudanças climáticas,

assim como a alteração dos padrões de uso e ocupação do solo que alteram a dinâmica do ciclo hidrológico natural.

Nesse sentido, o trabalho propõe realizar uma modelagem hidrodinâmica afim de identificar os pontos mais vulneráveis da cidade. O objetivo central da investigação é avaliar cenários de inundação e propor soluções para elevar a resiliência do Sistema de Proteção Contra Cheias (SPCC) de Porto Alegre.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Porto Alegre (Figura 1), a capital do Rio Grande do Sul, estende-se por 471,85 km² e está situada entre os paralelos 29° e 30° sul e os meridianos 50° e 51° oeste. Fazendo fronteira com os municípios de Canoas, Cachoeirinha, Viamão, Alvorada e Eldorado do Sul, a cidade ocupa uma posição estratégica no Mercosul, equidistante de capitais como Buenos Aires, Montevidéu, São Paulo e Rio de Janeiro. Sua geografia é variada, combinando morros, áreas baixas e o Lago Guaíba.

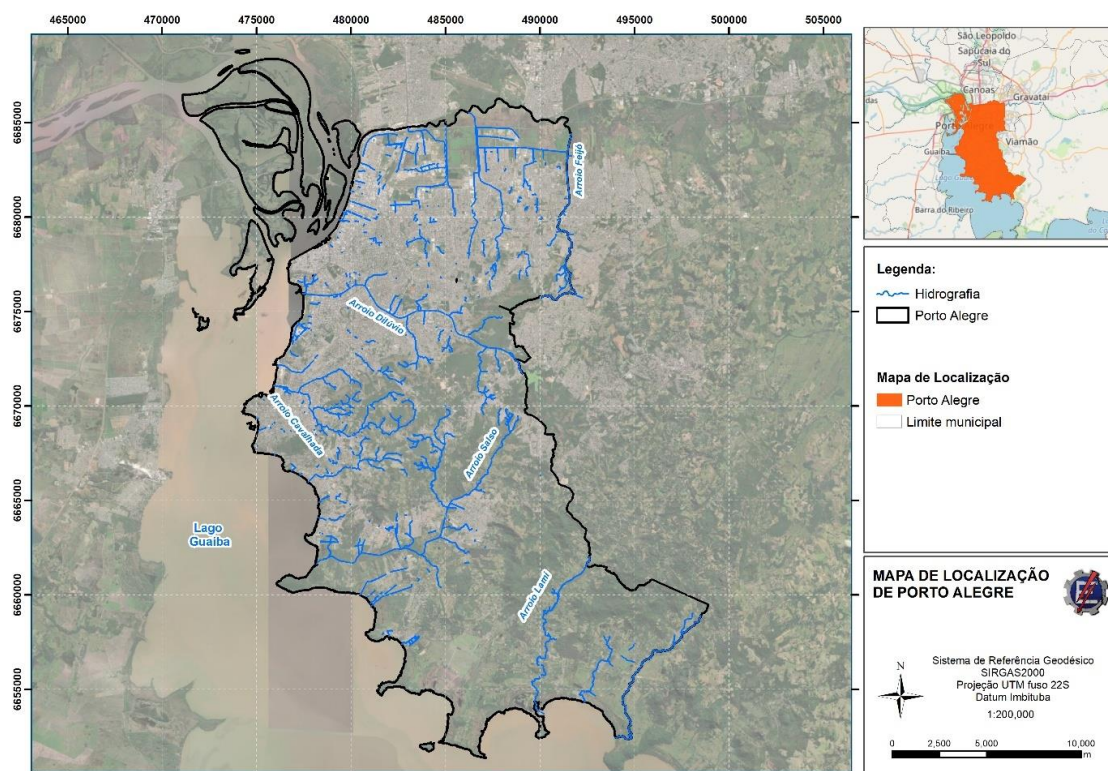


Figura 1: Localização da cidade de Porto Alegre.

A geomorfologia do município é diversificada, exibindo uma amplitude altimétrica (Figura 2) que varia de 0 a 312 metros acima do nível do mar; as cotas mais baixas concentram-se nas áreas adjacentes ao Guaíba, enquanto as elevações predominam nas regiões central e periférica.

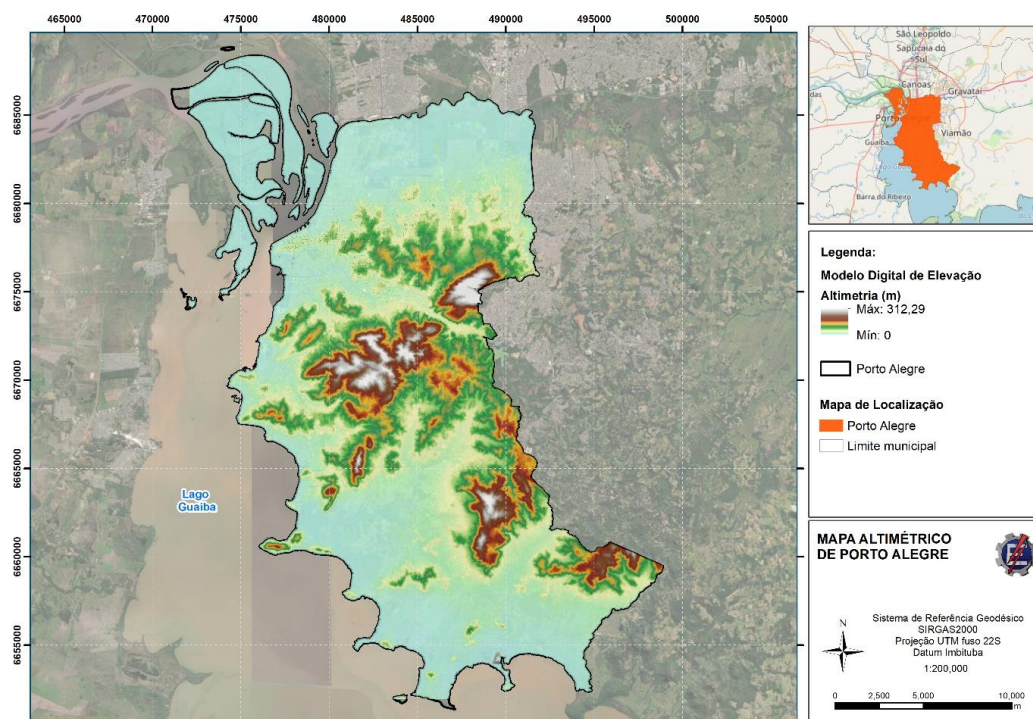


Figura 2: Mapa altimétrico do município de Porto Alegre

No que tange aos aspectos climatológicos, o clima de Porto Alegre é subtropical do tipo Cfa, segundo a classificação de Köppen (Alvares et al, 2013), com duas estações bem definidas; verões quentes e invernos frios e chuvosos (Dubreuil et al., 2018), condição determinada tanto pela latitude, como pela ação dos anticiclones do oceano Atlântico e do móvel polar. Essa configuração confere ao município, e ao Rio Grande do Sul como um todo, uma dinâmica climática distinta do restante do território nacional. Registra-se uma temperatura média anual de aproximadamente 19,9°C, com oscilações sazonais que variam de 25°C em janeiro a 14°C em julho.

Estudos locais corroboram essa dualidade, Weschenfelder et al. (2015) ao analisarem dados de 1996 a 2014, concluíram que eventos intensos com duração de até 8 horas, especialmente na primavera, possuem gênese predominantemente convectiva. A distribuição espacial e temporal das chuvas na Região Sul é fortemente modulada pelo fenômeno ENOS (El Niño Oscilação Sul). Segundo Fernandes et al. (2021), anos de La Niña tendem a apresentar secas relevantes, enquanto anos de El Niño (especialmente de intensidade moderada a forte) favorecem precipitações acima da média (Collischonn, 2025).

Adicionalmente, o cenário de mudanças climáticas indica um aumento na frequência e intensidade de episódios extremos (IPCC, 2023), afetando desproporcionalmente regiões tropicais e países em desenvolvimento. Pesquisas específicas para o Sul do Brasil já detectam alterações nos padrões de precipitação severa (Trenberth et al., 2015; Ávila et al., 2016; Heinrich et al., 2021). A

materialização desse risco é evidenciada pelos desastres recentes que atingiram o Rio Grande do Sul em setembro de 2023 e maio de 2024 (Collischonn et al., 2025).

METODOLOGIA

Em vista de alcançar o objetivo proposto de avaliar cenários de inundações e propor soluções com base em medidas estruturais para o sistema de proteção contra cheias em Porto Alegre/RS, foi realizado uma modelagem hidrodinâmica para região de interesse.

O processo de modelagem hidrodinâmica se iniciou com a consolidação do Modelo Digital de Terreno (MDT) com a calha, desenvolvido a partir do fornecimento de informações disponibilizadas pela prefeitura de Porto Alegre e Metrolplan, no qual foi realizado a interpolação espacial dos pontos e curvas de níveis geradas pelos diferentes métodos, utilizando o interpolador Topo To Raster da plataforma de geoprocessamento ArcMap 10.8. Essa ferramenta utiliza um método de interpolação desenvolvido especificamente para a criação de Modelos Digitais de Elevação (MDE) hidrologicamente corretos.

O êxito do método Topo to Raster se dá por permitir que, além de arquivos de pontos, podem ser usados outros formatos de arquivos como: curvas de nível, delimitações de rios ou lagos, contorno de penhascos e delimitações de bacias, diminuindo, durante o processo de interpolação, os possíveis erros que venham a ser cometidos pelo método. A interpolação dos dados é feita utilizando a soma ponderada dos quadrados dos resíduos a partir dos dados de elevação da superfície representada pela grade amostral (Hutchinson, 2009).

Esse método de interpolação foi criado com o objetivo específico de converter dados vetoriais em modelos hidrológicos de elevação de terrenos exatos. O método se utiliza da eficiência computacional da interpolação local, como ponderação do inverso da distância, sem perder a continuidade superficial dos métodos globais de interpolação, como krigagem e spline. Esta interpolação gerou uma matriz topográfica com resolução de 1 metro.

Uma vez desenvolvido o MDT base, a calha foi elaborada a partir da interpolação de pontos topobatimétricos, utilizando-se polilinhas 3D (ao menos quatro), de modo a conformar as inflexões de uma calha trapezoidal.

O software utilizado para a modelagem hidrodinâmica das cheias foi o HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System) elaborado pela USACE (US Army Corps of Engineering). A versão utilizada do software foi a 6.0 e pode ser obtida em [<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>]. Este programa permite o cálculo da hidráulica em regime permanente e não permanente. O sistema é composto de uma interface de usuário,

componentes de análise hidráulica, componentes de armazenamento e gerenciamento de dados, visualização, mapeamento e elaboração de relatório de resultados.

Considerando o escopo da simulação e a impossibilidade de caracterização detalhada da rugosidade de cada trecho simulado, algumas generalizações foram realizadas. Foi utilizado um mapa de uso do solo, elaborado a partir de mapas de uso produzidas com a série histórica de imagens do satélite Sentinel-2 L1C, com resolução de 10 m, utilizando a moda das ocupações ocorridas ao longo do ano de 2020. Para isso, foi utilizada uma rotina de programação desenvolvida dentro da plataforma do Google Earth Engine.

Tabela 1 – Valores do coeficiente de Manning adotados para representação do evento de inundação

Uso do solo	Manning adotado
Lavouras	0,10
Água	0,04
Reflorestamento/Arbustivo	0,07
Formação Florestal	0,10
Área urbana/Construída	0,15
Banhado/Área úmida	0,10
Solo exposto	0,07
Campo	0,30

Fonte: Próprio autor

A Figura 3 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a geometria utilizada para representação do cenário atual na modelagem e calibração do evento observado, bem como a representação da ponte existente. A geometria, por sua vez, teve que ser associada a um mapa de uso do solo para vinculação à valores do coeficiente de Manning para cada célula.

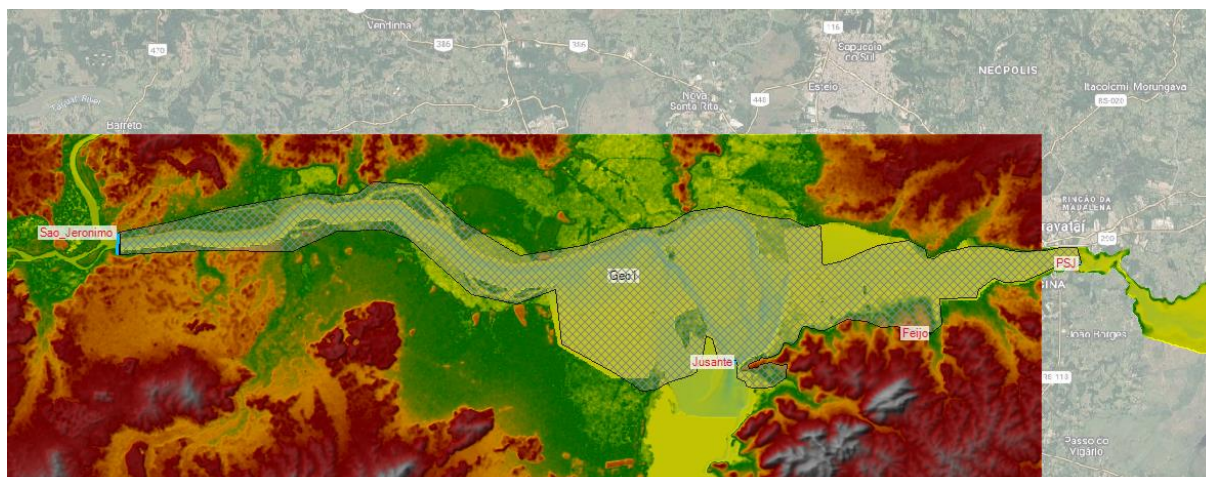


Figura 3: Geometria e condições de contorno elaborados para modelagem hidráulica

Os próprios dados das estações linimétricas podem ser utilizadas para definição das condições de contorno para modelagem hidráulica, a depender da qualidade, disponibilidade temporal e correlação entre as informações disponíveis.

Para o presente estudo foram utilizados dados de nível máximos observado na cheia de 2024 dos rios Gravataí e Jacuí, assim como estações linimétricas constituídas dentro do perímetro urbano de Porto Alegre (Estação do Gasômetro, Cais Mauá e Arroio Feijó).

RESULTADOS

A Figura 4 apresenta a mancha de inundação simulada com a elevação da linha d'água máxima. Este tipo de mapeamento é crucial para delimitar o alcance máximo da lâmina d'água durante o evento extremo, permitindo avaliar a ocupação de planícies de inundação e identificar falhas nos sistemas de proteção contra cheias.

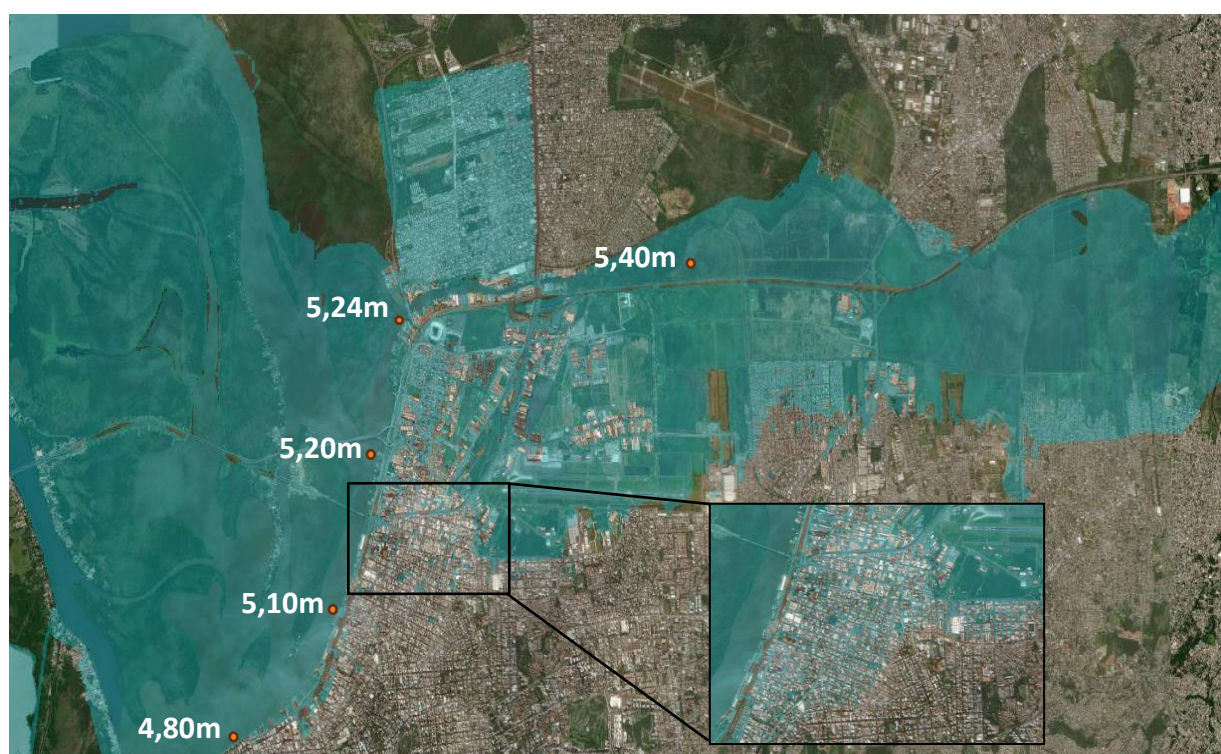


Figura 4: Mancha de inundação simulada com a elevação da linha d'água máxima

A distribuição da mancha de inundação evidencia o avanço das águas sobre as cotas topográficas mais baixas, caracterizando o que chamamos de planície aluvial. Observa-se que vastas áreas densamente urbanizadas (como a Zona Norte da cidade, bairros como Humaitá, Sarandi e municípios vizinhos como Canoas) estão completamente contidas dentro do polígono de inundação. Isso indica que a expansão urbana ocorreu sobre o leito maior sazonal dos rios.

A imagem ilustra o clássico efeito de remanso (*backwater effect*). O volume excessivo no corpo d'água receptor (à esquerda) impede o escoamento natural das águas das bacias afluentes, forçando o retorno da água pelo rio Gravataí e o extravasamento sobre a malha urbana.

Um dos pontos mais críticos visíveis na mancha de inundação é o comprometimento total de infraestruturas estratégicas. No centro da imagem, as pistas de pouso e decolagem e os pátios de manobra do Aeroporto Internacional Salgado Filho encontram-se integralmente sob a água. Isso paralisa a logística aérea de toda a região.

Além disso, diversas vias expressas e rodovias de integração metropolitana estão seccionadas pela mancha de água. Algumas estruturas lineares (rodovias elevadas ou trilhos) aparecem como linhas secas cortando o espelho d'água, funcionando muitas vezes, de forma não intencional, como diques que barram e acumulam a água em determinados regiões.

A presença da água em bairros que historicamente são protegidos por diques e casas de bombas (sistema de polderes) indica o colapso ou a inoperância do sistema de proteção contra cheias. A mancha contínua demonstra que a cota de inundação alcançou níveis superiores aos parâmetros de projeto das estruturas de contenção existentes.

A partir da análise das saídas da modelagem hidrodinâmica e da interpretação da dinâmica do escoamento superficial, procedeu-se à demarcação e espacialização das zonas mais vulneráveis de entrada de água na cidade (Figura 5). A avaliação do comportamento do fluxo hídrico permitiu delimitar as áreas de maior suscetibilidade topográfica, identificando, assim, os setores urbanos que apresentam os mais elevados índices de vulnerabilidade física e estrutural perante o evento extremo.

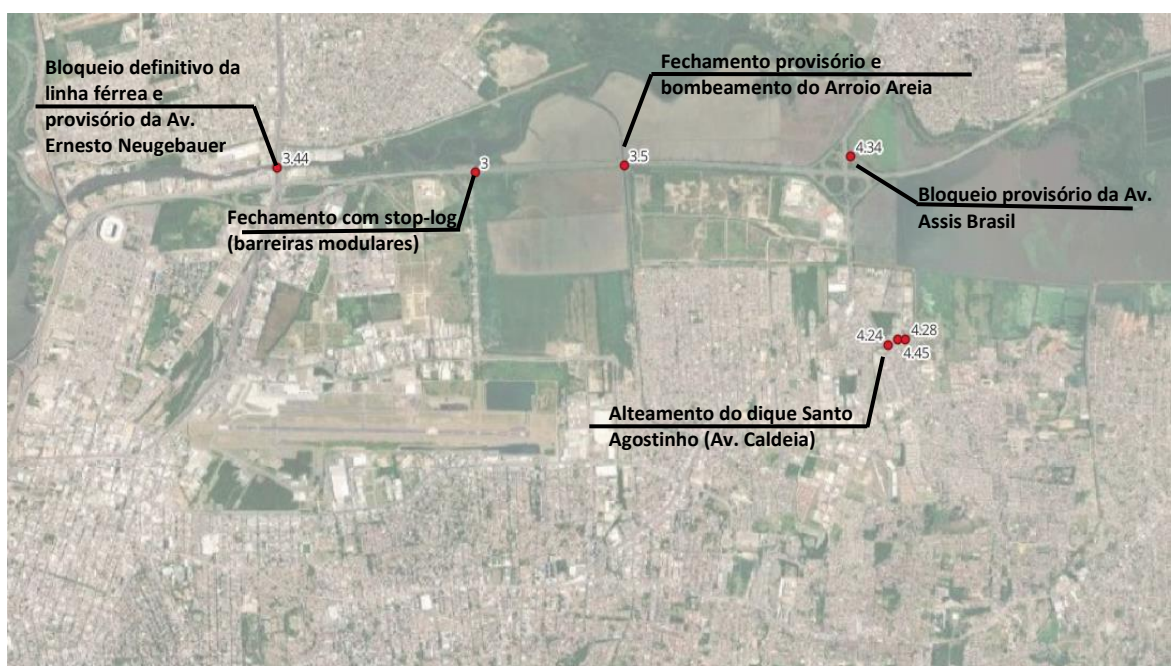


Figura 5: Localização das zonas mais vulneráveis de entrada de água na cidade, com base na análise de escoamento do fluxo hídrico, e soluções propostas para resiliência climática.

CONCLUSÃO

Em síntese, o presente estudo demonstrou o diagnóstico preciso da dinâmica de eventos hidrológicos extremos. A espacialização da mancha de inundação e a análise do escoamento superficial revelaram que o severo efeito de remanso provocado pelo Rio Guaíba e o extravasamento do rio Gravataí subjugaram as cotas topográficas de segurança previamente estabelecidas, provocando um refluxo no arroio Areia, arroio Passo das Pedras e arroio Santo Agostinho. Consequentemente, áreas densamente urbanizadas e infraestruturas vitais para cidade, notadamente o complexo aeroportuário e os eixos rodoviários, registraram índices críticos de vulnerabilidade física, evidenciando o colapso generalizado dos sistemas de macrodrenagem e contenção (polderes e diques).

As análises do comportamento do fluxo hídrico atestam que o elevado grau de exposição e o risco material observados não decorrem apenas da magnitude pluviométrica, mas do histórico avanço do tecido urbano sobre as planícies aluviais naturais. A inoperância do sistema de proteção contra cheias indica uma defasagem técnica direta nos parâmetros de projeto originais, cujos tempos de retorno (TR) e cotas de coroamento já não refletem a frequência e a intensidade da nova realidade climática. Essa constatação comprova que a resiliência estrutural instalada é insuficiente para dissipar a energia da onda de cheia e mitigar seus impactos socioeconômicos em cadeia.

Por fim, os resultados cartográficos e quantitativos obtidos fornecem subsídios científicos indispensáveis para a formulação de um novo paradigma de planejamento urbano e adaptação climática. Torna-se imperativo, como desdobramento imediato, o recálculo das cotas de projeto para todas as obras de infraestrutura, bem como o mapeamento rigoroso e a restrição de uso das zonas de alto risco hidrológico identificadas. Para garantir a segurança futura, a engenharia urbana deverá transcender o modelo exclusivo de barreiras físicas, integrando soluções baseadas na natureza, planos de contingências e o redesenho do espaço construído para aumentar a capacidade de infiltração e o amortecimento natural da bacia hidrográfica.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Diretrizes para a consideração de impactos da mudança do clima na adaptação ao risco hidrológico de eventos extremos de máxima na Região Sul do Brasil*. Nota Técnica N° 3/2024/COMUC/SHE. Documento n° 02500.030195/2024-92. Brasília, 4 jun. 2024.

ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., GONÇALVES, J. D. M., & SPAROVEK, G. (2013). "Köppen's climate classification map for Brazil". *Meteorologische zeitschrift*, 22(6), 711-728.

- ÁVILA, A., JUSTINO, F., WILSON, A., BROMWICH, D., & AMORIM, M. (2016). “Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil”. *Environmental Research Letters*, 11(11), 114029.
- COLLISCHONN, W., FAN, F. M., POSSANTTI, I., DORNELLES, F., PAIVA, R., MEDEIROS, M. S., ... & PICCILLI, D. G. A. (2025). “The exceptional hydrological disaster of April-May 2024 in southern Brazil”. *RBRH*, 30, e1.
- DUBREUIL, V., FANTE, K. P., PLANCHON, O., & NETO, J. L. S. A. (2018). “Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015”. *Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia*, (37).
- FERNANDES, V. R., DO AMARAL CUNHA, A. P. M., PINEDA, L. A. C., LEAL, K. R. D., COSTA, L. C., BROEDEL, E., & MARENGO, J. (2021). “Secas e os impactos na região sul do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*”, 28, 561-584.
- HEINRICH, V. H., DALAGNOL, R., CASSOL, H. L., ROSAN, T. M., DE ALMEIDA, C. T., SILVA JUNIOR, C. H., ... & ARAGÃO, L. E. (2021). “Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change”. *Nature communications*, 12(1), 1785.
- IPEA (2024). *Enchentes e inundações no Rio Grande do Sul em 2024: impactos e desafios para a gestão integrada*. Boletim Regional, Urbano e Ambiental, Brasília, n. 33, dez. 2024.
- IPCC (2023): *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- PETRY, I., MIRANDA, P. T., PAIVA, R. C. D. D., COLLISCHONN, W., FAN, F. M., FAGUNDES, H. D. O., ... & SOUZA, S. (2025). “Changes in flood magnitude and frequency projected for vulnerable regions and major wetlands of south America”. *Geophysical Research Letters*, 52(5).
- TRENBERTH, K E.; FASULLO, J T.; SHEPHERD, THEODORE G. (2015). “Attribution of climate extreme events”. *Nature climate change*, v. 5, n. 8, p. 725-730.
- WESCHENFELDER, A. B., RODRIGUES, B. D., KLERING, E. V., & ALVES, R. C. M. (2015). “Identificação de precipitações convectivas para série de precipitações máximas anuais de Porto Alegre-RS na primavera”.