

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

MAPEAMENTO DO PERIGO DE INUNDAÇÕES COM UTILIZAÇÃO DE MODELAGEM HIDRODINÂMICA 2D: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO PIRAUQUÊ-CABUÇU, RIO DE JANEIRO/RJ

Bruno Magno Simões de Carvalho¹; Matheus Fernandes Vilhena Campinho²; Francis Martins Miranda³ & Osvaldo Moura Rezende⁴

Abstract: Flood events can be classified as socio-natural disasters capable of causing severe damage to communities. The urbanization process combined with climate change, tends to intensify the frequency and magnitude of these events. Among the non-structural measures within a flood risk management approach, the use of hydrological and hydrodynamic models stands out as a tool for hazard mapping and for supporting physical interventions in the basin. In this context, the present study presents a flood hazard mapping through two-dimensional hydrodynamic modeling using the HEC-RAS software in the Piraquê-Cabuçu River basin, a coastal watershed located in the city of Rio de Janeiro-RJ. The calibration and validation process was based on two extreme events in the basin, during which water depth measurements were recorded in situ. The results enabled the identification of the most affected areas and a better understanding of the event dynamics, thus providing support for enhancing resilience within the basin.

Resumo: Eventos de inundação podem ser classificados como desastres socionaturais capazes de causar danos severos a comunidades. O processo de urbanização associado às mudanças climáticas tende a acentuar a frequência e magnitude desses eventos. Dentre as medidas não estruturais dentro de uma abordagem de gestão do risco de inundações, destaca-se o emprego de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos como ferramenta para mapeamento do perigo e capazes de fornecer subsídios para intervenções físicas na bacia. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta o mapeamento do perigo de inundação em dois eventos extremos através de modelagem hidrodinâmica bidimensional com uso do software HEC-RAS na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, uma bacia costeira localizada na cidade do Rio de Janeiro-RJ. O processo de calibração e validação foi realizado com base em extensão e alturas de lâmina d'água registradas *in loco*. Os resultados obtidos possibilitaram a identificação das regiões mais afetadas e a compreensão da dinâmica dos eventos, fornecendo subsídios para o aumento da resiliência na bacia.

Palavras-Chave – Gestão do Risco de Inundações; Perigo de Inundações; Rio Piraquê-Cabuçu

¹ Escola Politécnica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, brunomagno@poli.ufrj.br

² Escola Politécnica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, mfvc.campinho@gmail.com

³ Escola Politécnica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, francismmiranda@gmail.com

⁴ Escola Politécnica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, omrezende@poli.ufrj.br

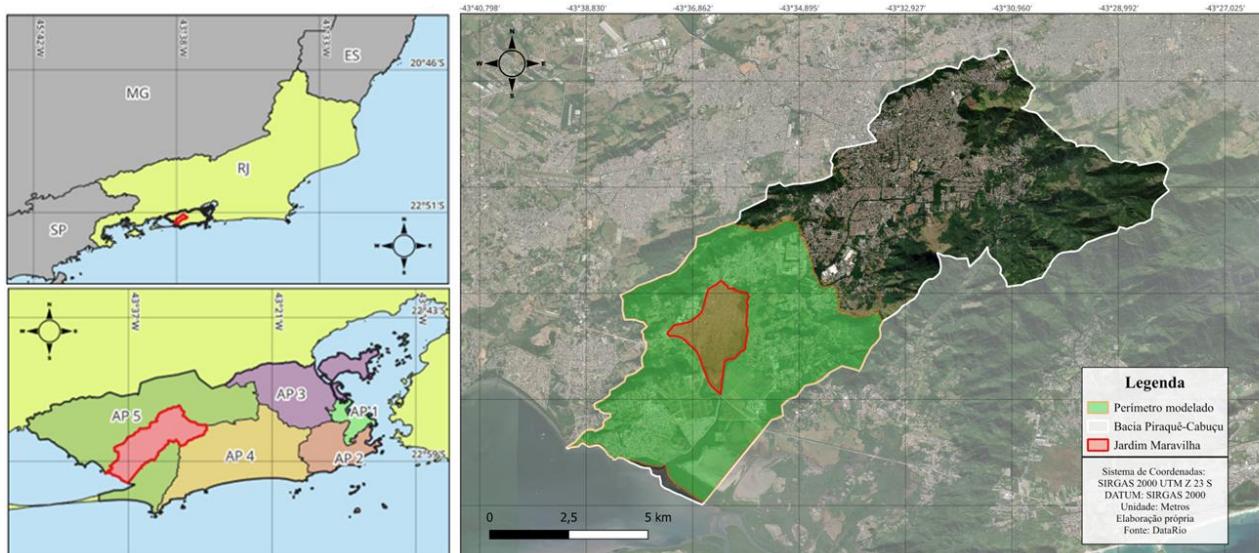
INTRODUÇÃO

As inundações urbanas estão entre os desastres sacionaturais mais recorrentes e devastadores globalmente, resultando em perdas significativas de vidas e bens materiais. No Brasil, foram registrados 6.183 eventos de inundação entre 1991 e 2023, que deixaram aproximadamente 3,88 milhões de desabrigados e causaram prejuízos da ordem de 45 bilhões de reais (CEPED/UFSC, 2022). O processo de avanço da urbanização juntamente com a alteração nos padrões climáticos tende a alterar o balanço hídrico local intensificando a frequência e magnitude desses eventos.

A análise do risco de inundações considera o risco como função do perigo e da vulnerabilidade do sistema socioeconômico (MONTEIRO *et al.*, 2015). O perigo de inundaçao pode ser caracterizado por uma ou mais propriedades combinadas, sendo as mais comumente utilizadas a extensão da inundaçao, a altura da lâmina de inundaçao, a velocidade de escoamento e o tempo de permanêcia da lâmina. Para minimização dos impactos socioeconômicos das inundações, o mapeamento do perigo através de modelos hidrológicos-hidrodinâmicos validados se configura como uma medida não estrutural capaz de fornecer subsídios para intervenções físicas na bacia e o aumento da resiliênciia do sistema.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo principal caracterizar o perigo de inundações na região de jusante da bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu (Figura 1) por meio do desenvolvimento de um modelo hidrodinâmico bidimensional (2D) utilizando o software HEC-RAS. A calibração e validação do modelo é dada através da simulação de eventos de chuvas intensas ocorridos em 2010 e 2021. Com 108 km², a bacia do Rio Piraquê-Cabuçu tem deságue na Baía de Sepetiba e sofre com processo acelerado de urbanização, com destaque para o bairro de Jardim Maravilha.

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Piraquê-Cabuçu.



METODOLOGIA

A modelagem hidrodinâmica foi realizada utilizando o software HEC-RAS (versão 6.5), optando-se pelo módulo bidimensional (2D) para simular os escoamentos em condições não permanentes. Para a preparação dos dados geométricos, utilizou-se um Modelo Digital de Terreno (MDT) com resolução espacial de 5 metros, proveniente do Instituto Pereira Passos (IPP). Os dados topobatimétricos do rio Piraquê-Cabuçu foram obtidos do relatório Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais (PDMAP, 2012) e processados usando a ferramenta *WebPlotDigitizer*. Foram posicionadas 19 seções transversais no *RAS Mapper*, com interpolação de novas seções a cada 25 metros, totalizando 384 seções no trecho de estudo. Córregos e afluentes menores sem levantamento topobatimétrico foram representados como canais de pelo menos 1 metro de profundidade.

Os coeficientes de rugosidade de Manning foram definidos a partir de classes definidas pela Fundação RIO-ÁGUAS (2019) em arquivo raster de uso e ocupação do solo da bacia com resolução espacial horizontal igual a 1 metro (IPP, 2019). O domínio de modelagem computacional 2D foi delimitado na região de jusante da bacia, com uma malha inicial de células quadradas de 25 x 25 metros, totalizando 75.485 células. Para maior precisão em canais e áreas complexas, foram criadas linhas de quebra (*breaklines*) com células refinadas de 5 x 5 metros, resultando em uma malha final com 88.557 células computacionais.

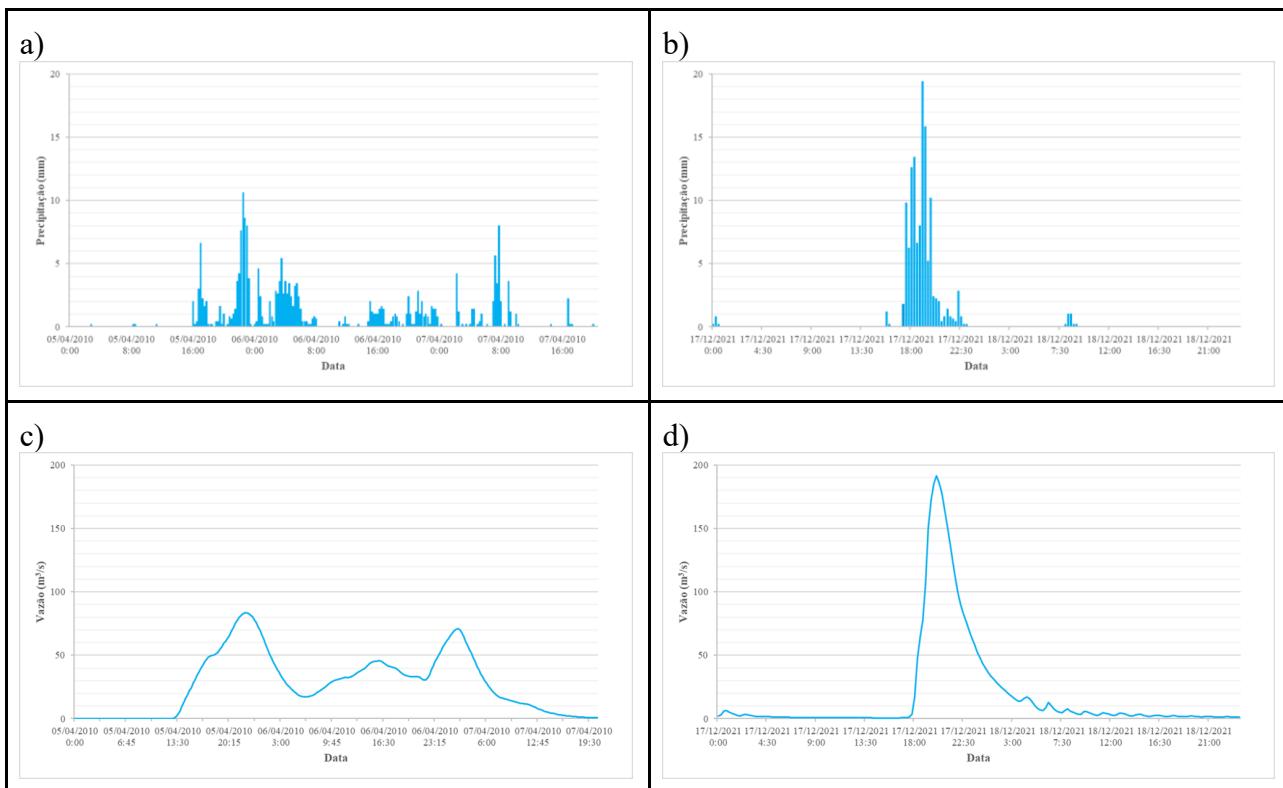
A calibração do modelo foi realizada com base no evento hidrológico ocorrido entre as 00:00 do dia 5 de abril às 20:30 ao dia 7 de abril de 2010, utilizando análise visual de mapas de inundação da Fundação Rio-Águas e uma mancha de inundação construída pelo Laboratório Água e Cidades (LAC-POLI/UFRJ). É importante destacar que os dados utilizados para calibração não apresentavam as alturas da lâmina d'água, mas sim a extensão do evento de inundação. A validação foi feita com base no evento das 00:00 do dia 17 de dezembro às 23:45 do dia 18 de dezembro de 2021, através da comparação dos dados de alturas de lâminas d'água em pontos específicos do Jardim Maravilha, fornecidos pela Fundação Rio-Águas.

As condições de montante consistiram em hidrogramas de vazões com discretização temporal de 15 minutos, obtidos através de estudos desenvolvidos pela equipe técnica do LAC/UFRJ (TABET, 2023) para os eventos de calibração e validação, conforme Figura 2. As condições de jusante incluíram as variações do nível d'água na Baía de Sepetiba, introduzidas como condição de nível variável no tempo, com dados de maré obtidos de registros de marégrafos do Porto de Itaguaí (DHN), com resolução temporal de 15 minutos. As condições de precipitação utilizaram dados pluviométricos reais do posto de Campo Grande do Sistema Alerta Rio, com uma precipitação total no cenário de calibração (2010) de 208 mm em 3 dias, enquanto no cenário de validação (2021) de 129,2 mm em 2 dias, também discretizados em intervalos de 15 minutos.

No evento de 2021, as chuvas foram intensas e concentradas em apenas 3 horas, enquanto no evento de 2010, as precipitações ocorreram de forma mais uniforme ao longo do período analisado.

O processamento foi realizado em computador com 16 GB de RAM e processador Intel Core i7 13th 1360P, com tempo de simulação na ordem de 12 horas para o cenário de calibração e 8 horas para o de validação. A malha computacional final do modelo foi composta por 88.557 células computacionais e o passo de tempo escolhido foi de 1 minuto com registros de saídas a cada 15 minutos.

Figura 2 – a) Precipitação registrada em abril de 2010, b) Precipitação registrada em dezembro de 2021, c) Condição de contorno de vazão do evento 2010 e d) Condição de contorno de vazão do evento 2021.



RESULTADOS

A simulação do evento de abril de 2010 apresentou concordância satisfatória com as demarcações oficiais da Fundação Rio-Águas e do Laboratório de Água e Cidades (LAC-UFRJ), conforme Figura 3. O mapeamento confirmou as inundações na região do bairro Jardim Maravilha, corroborando observações de campo e relatos de moradores. As áreas mais impactadas coincidem com regiões de ocupações irregulares e favelas em cotas altimétricas inferiores a 2,50 metros em relação ao nível médio do mar de referência (Imbituba/IBGE). A baixa declividade do terreno favorece o acúmulo e espalhamento horizontal das águas e a influência do regime de marés da Baía de Sepetiba contribui para a redução da capacidade hidráulica da bacia.

Foi realizada uma comparação da lâmina de inundação; para esse exercício, lâminas inferiores a 15 cm foram consideradas desprezíveis, visto que teoricamente seriam captadas pela microdrenagem ou configurariam lâminas sem consequências significativas para danos tangíveis. Os resultados comparativos obtidos com os registros da Fundação Rio-Águas para as áreas urbanizadas, apresentados na Figura 4, apontam que trechos à margem do Rio Piraquê-Cabuçu, principalmente a porção norte da região modelada, sofreram maiores impactos. Foram identificados locais específicos que apresentam manchas de inundação superiores a 1,0 m.

Figura 3 – Resultado da simulação do cenário de calibração - altura de inundação (dados Rio Águas)

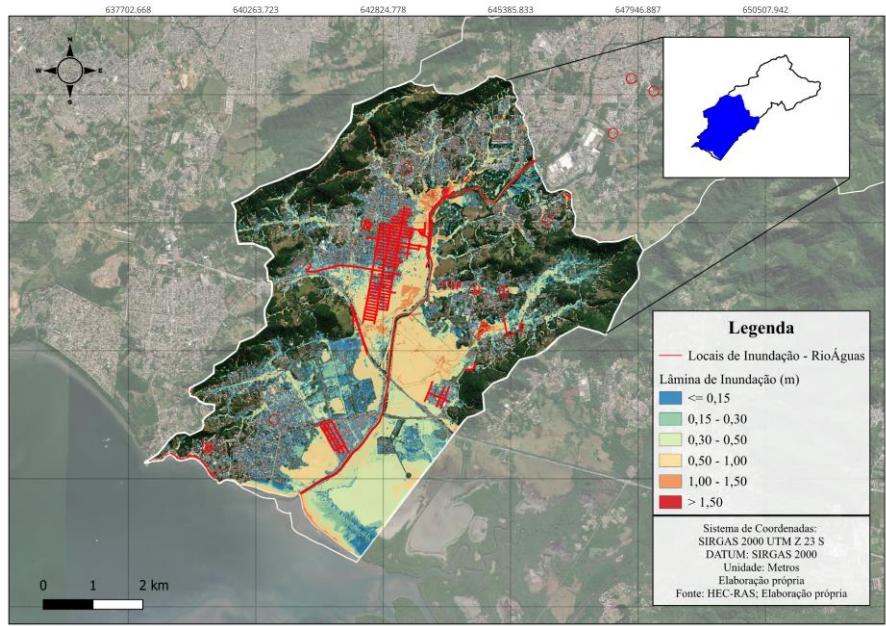
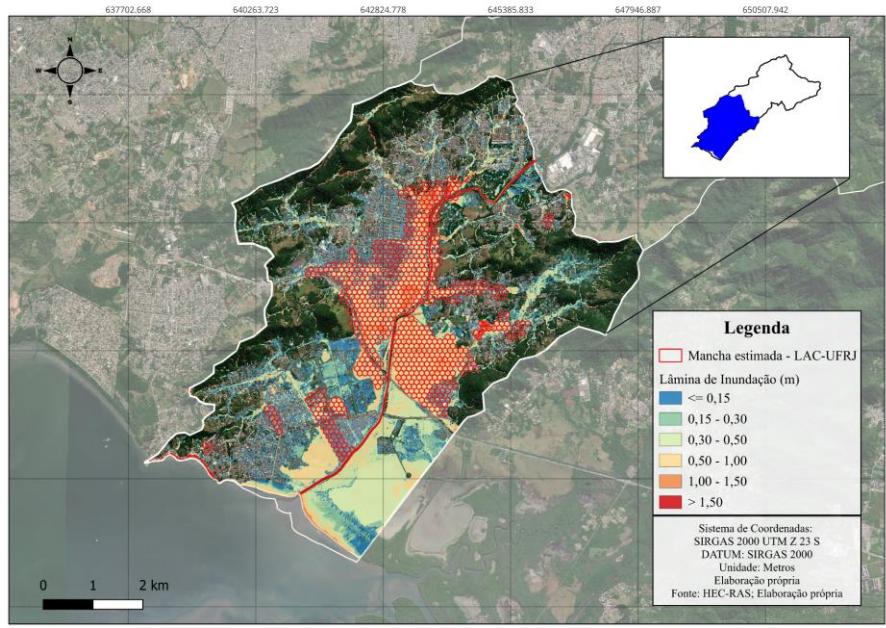
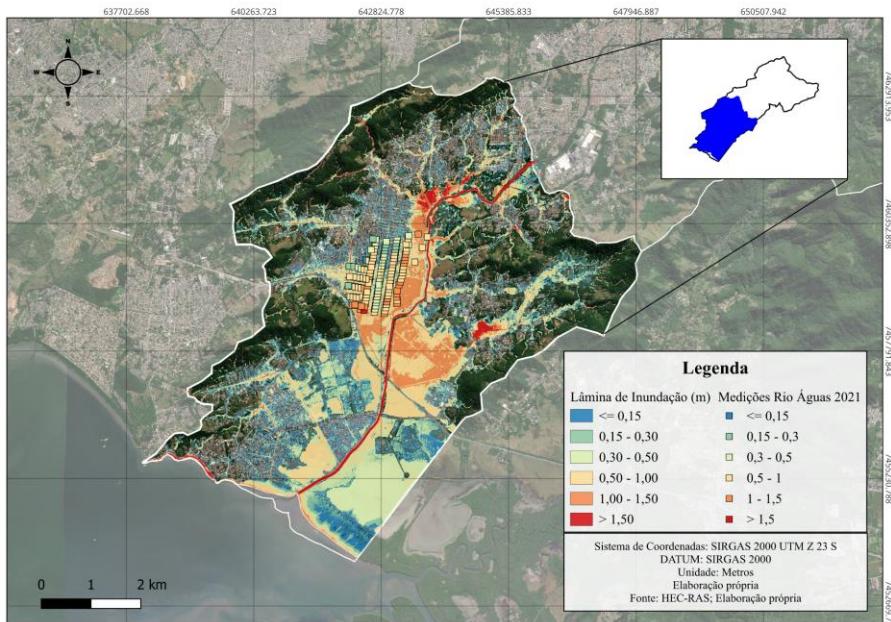


Figura 4 – Resultado da simulação do cenário de calibração - altura de inundação (dados LAC-POLI/UFRJ)



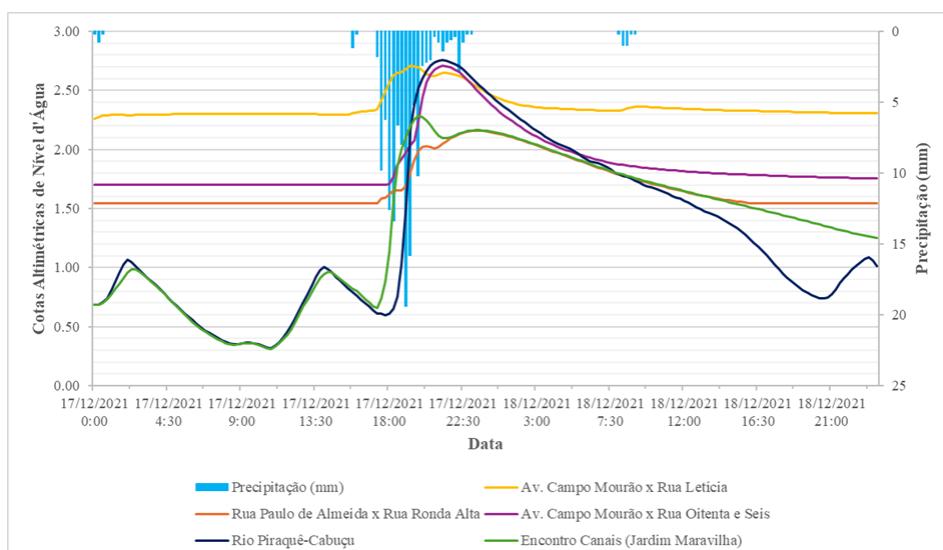
A validação foi realizada comparando-se o cenário de dezembro de 2021 com alturas de lâmina medidos em campo pela Fundação Rio-Águas, conforme apresentado na Figura 5. A comparação entre valores medidos e simulados registrados nas principais ruas do bairro Jardim Maravilha, mostrou aproximação satisfatória, com erro médio de 11%. A análise de regressão apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,8191 e coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,738, indicando calibração satisfatória dos parâmetros.

Figura 5 – Resultado da simulação do cenário de validação - altura de inundação (dados Rio-Águas).



Com base na análise desenvolvida, considera-se que o modelo hidrodinâmico construído para simulação dos eventos de 2010 e 2021 encontra-se validado, apesar do emprego de metodologia não usual, porém útil para locais com ausência de registros mais robustos. A Figura 6 representa a propriedade do perigo de inundações associado à altura de lâmina d'água em locais estratégicos dentro do Bairro Jardim Maravilha, representando a dinâmica de inundações dentro da região para o evento de 2021. É possível observar que regiões internas ao bairro atingem níveis d'água elevados antes de receberem o excedente fluvial.

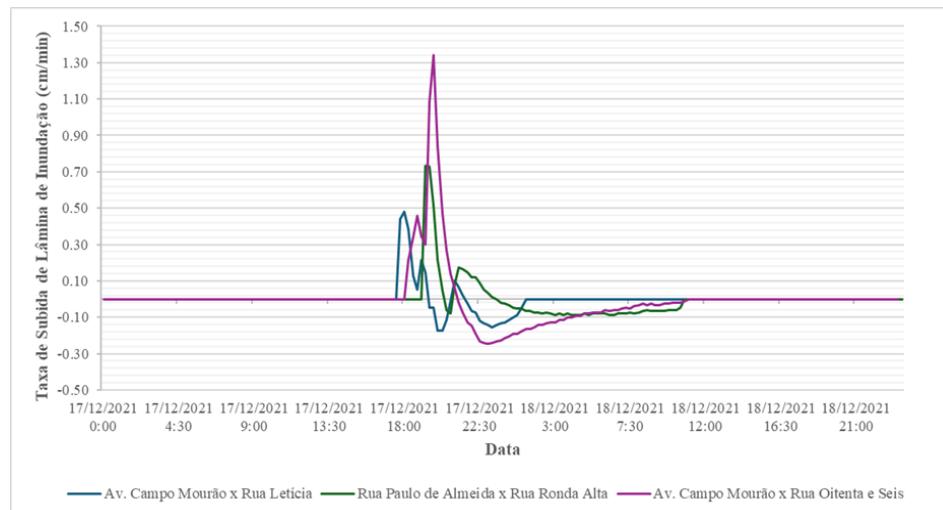
Figura 6 – Nível d'água para os pontos explorados no bairro Jardim Maravilha, para o evento de 2021.



A Figura 7 apresenta uma propriedade do perigo de inundação denominada taxa de ascensão de lâmina, a qual tem por objetivo interpretar a dinâmica de elevação e recessão do nível d'água sobre

uma superfície inundável. Destaca-se o ponto na Av. Campo Mourão x Rua Oitenta e Seis onde é possível observar uma taxa de ascensão elevada seguida de longo tempo de recessão.

Figura 7 – Taxa de ascensão das lâminas d’água no bairro Jardim Maravilha para o evento de dezembro de 2021.



Águas com velocidades elevadas e grande profundidade podem causar impactos significativos, desde danos localizados a estruturas até o arrastamento de pessoas, veículos e edifícios. Para o evento de 2021, as velocidades de fluxo mantiveram-se entre 0,25 m/s e 0,50 m/s (Figura 8), com valores ligeiramente maiores ao evento de 2010 devido à maior intensidade pluviométrica. Da mesma forma, observam-se valores mais elevados do fator de velocidade ao longo do Jardim Maravilha, variando entre 0,25 e 0,70 m²/s (Figura 9), em função principalmente do aumento das lâminas de inundação.

Figura 8 – Resultados da simulação do cenário de validação - velocidades de fluxo

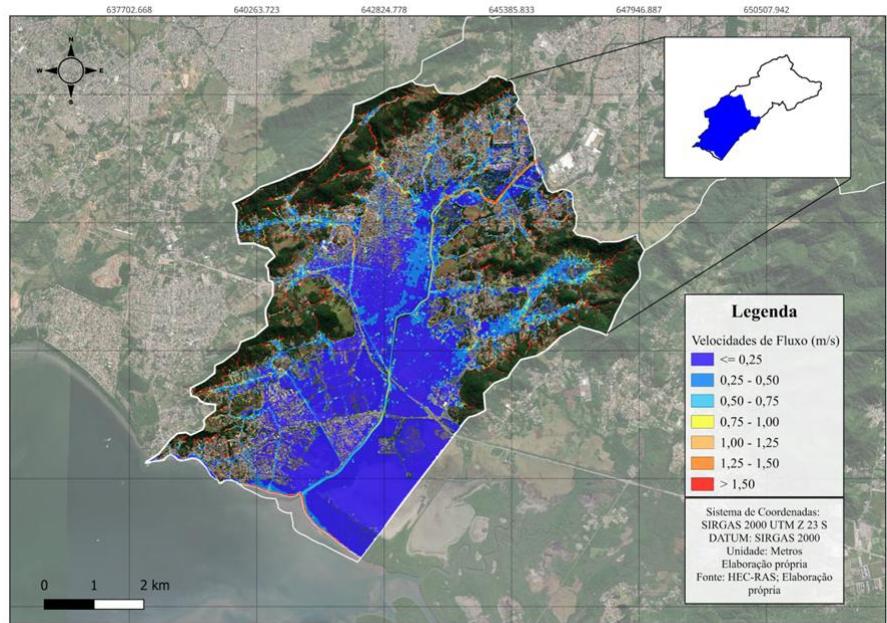
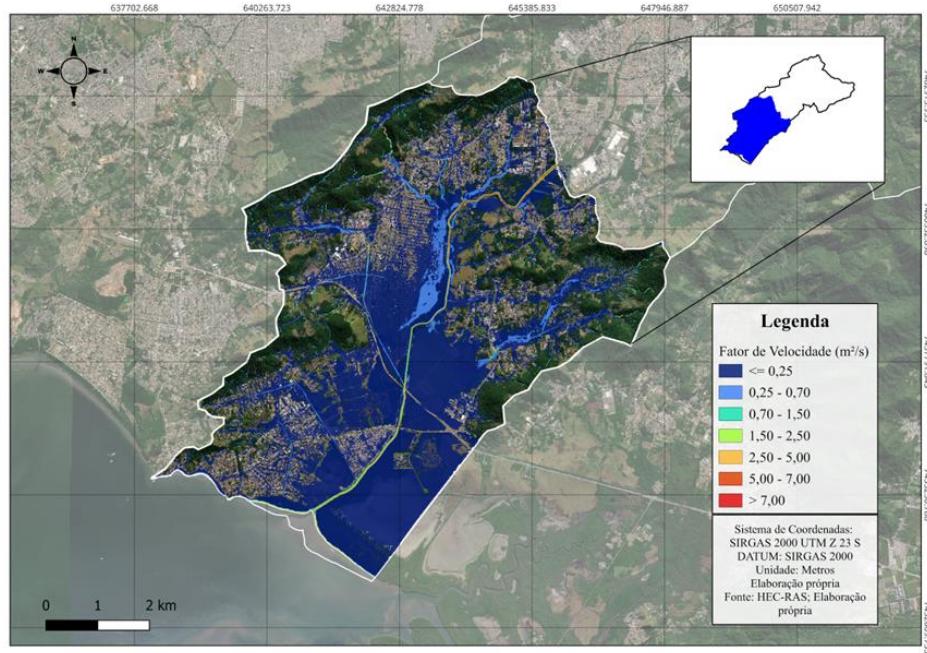
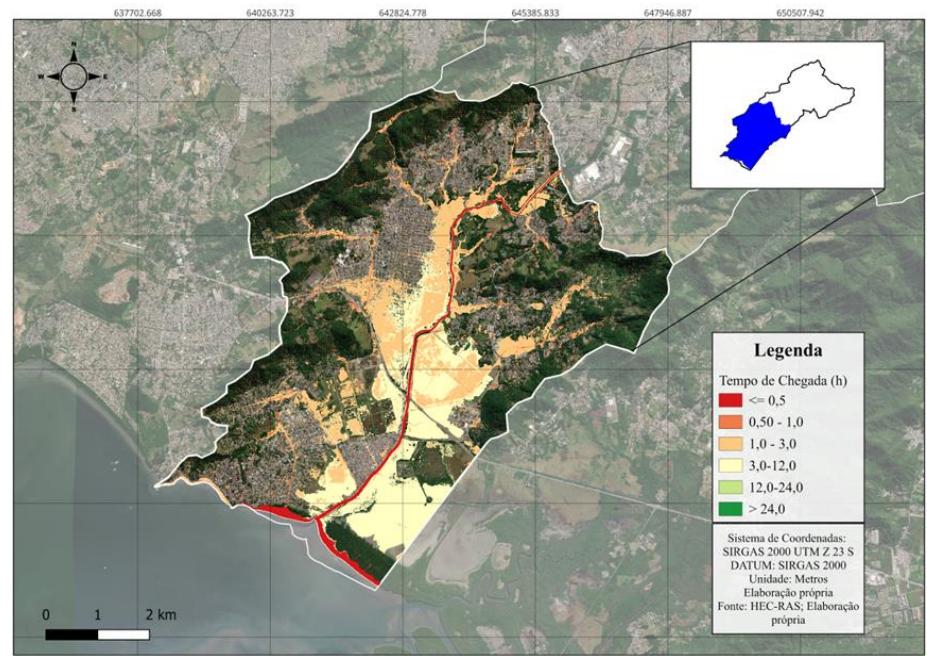


Figura 9 – Resultado da simulação do cenário de validação - fator de velocidade (FV)



A propriedade do perigo denominada tempo de chegada representa o quanto rápido a mancha de inundação atinge determinadas áreas a partir do início da precipitação, podendo indicar áreas prioritárias para a emissão de alertas. No evento de 2021, os tempos de chegada de lâminas superiores à 30 cm variaram entre 1 e 3 horas para a maior parte da área do Jardim Maravilha, bem como para os trechos ao longo das margens do rio Piraquê-Cabuçu, conforme apresentado na Figura 10.

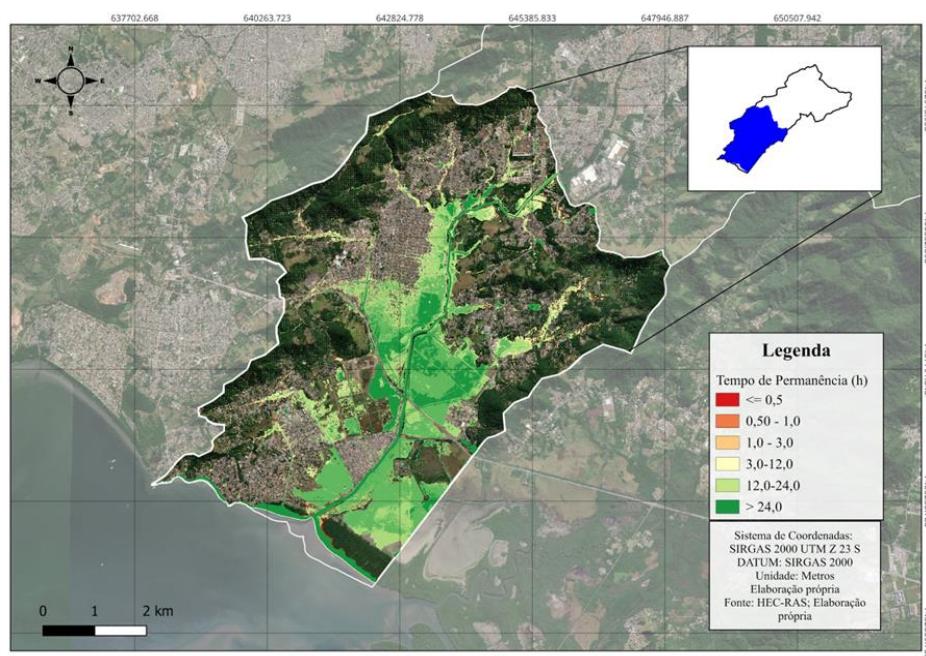
Figura 10 – Resultado da simulação do cenário de validação - tempo de chegada para lâminas de 30 cm de inundação



A propriedade tempo de permanência indica, principalmente, o potencial de danos às estruturas, risco de contaminação por doenças de veiculação hídrica e o grau de interrupção de serviços de infraestrutura urbana, como por exemplo o transporte público. O tempo de permanência de lâminas superiores à 30 cm apresentou predominância entre 12 e 24 horas, com valores menores que 2010 devido à concentração da precipitação em período mais curto, conforme apresentado na Figura 11.

O resultado do mapeamento do tempo de permanência neste cenário, com uma chuva de cerca de 3 horas, confirma a criticidade da região, que mesmo após o fim da precipitação, apresenta locais com inundações por muitas horas.

Figura 11 – Resultado da simulação do cenário de validação - tempo de permanência de lâminas acima de 30 centímetros



CONCLUSÕES

O presente estudo alcançou seu objetivo principal de caracterizar o perigo de inundações na região a jusante da bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu, através do desenvolvimento de um modelo hidrodinâmico bidimensional no software HEC-RAS utilizando dois diferentes eventos extremos como referência. O trabalho enfrentou limitações relacionadas principalmente à disponibilidade e qualidade dos dados disponíveis, tornando-se necessária a adoção de metodologia não usual para calibração e validação do modelo.

A modelagem corroborou com as manchas de inundações utilizadas como parâmetro de calibração e validação, confirmado a criticidade da bacia em especial para o bairro de Jardim Maravilha. O modelo desenvolvido apresentou capacidade satisfatória de reproduzir os eventos analisados, demonstrada pelo coeficiente de determinação (R^2) de 0,8191 obtido na comparação com dados de altura de lâmina de inundações medidos em campo.

Considerando os resultados encontrados, recomenda-se a realização de estudo hidrológico mais detalhado da região, com refinamento dos parâmetros hidráulicos e hidrológicos, além de levantamento topográfico/batimétrico mais preciso e extenso para melhor representação da hidrografia da bacia. Sugere-se também a construção de mapas de perigo resultantes de eventos hidrológicos sintéticos (chuvas de projeto) e a implementação de análises considerando cenários de mudanças climáticas e diferentes usos e ocupações do solo para construção de cenários de intervenção na bacia.

Os mapas de perigo gerados constituem ferramentas didáticas e claras para comunicação do risco, podendo auxiliar projetos de infraestrutura e planejamento urbano. A metodologia empregada demonstra ser uma ferramenta significativa para as autoridades responsáveis pela gestão de risco de inundações, contribuindo para o diagnóstico e planejamento territorial.

REFERÊNCIAS

- CEPED/UFSC (2023). Atlas Digital de Desastres Naturais. 2022. Disponível em: <<https://atlasdigital.mdr.gov.br/>>. Acesso em: 22 dez. 2023.
- IPP (2019). Modelo Digital de Terreno - 5m. Instituto Pereira Passos - IPP, Prefeitura do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- MONTEIRO, L. R.; KOBIYAMA, M.; ZAMBRANO, F. C. (2015), Mapeamento de Perigo de Inundação. Porto Alegre: UFRGS/IPH/GPDEN., 91 p. 1^a ed., 1^a revisão.
- PDMAP (2012). Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais da Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu. Fundação RIO-ÁGUAS, Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro.
- RIO-ÁGUAS (2019). Registros de Inundação da Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu. undação RIO-ÁGUAS, Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro.
- TABET, B.L. (2023). Mapeamento de Inundações com Uso de Modelagem Quasi-2D-Raster: Estudo de Caso da Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu. Rio de Janeiro: UFRJ/Escuela Politécnica, 2023. 98 p. Projeto de Graduação (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/Escuela Politécnica,.