

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

MODELAGEM HIDRODINÂMICA DA INUNDAÇÃO DE MAIO DE 2024 NO SUL DA LAGUNA DOS PATOS

*Quadros, R. S.¹; Baltazar, L. A.²; Buske, D.³; Beskow, T. L.⁴; Beskow, S.⁵; Leandro, D.⁶;
Lindemann, D. S.⁷; Fernandez, R. N.⁸; Santos, D. C.⁹; Repinaldo, H. F. B.¹⁰ & Teixeira, M. S.¹¹*

Abstract: Extreme atmospheric events have caused severe impacts in Rio Grande do Sul, resulting in flooding and inundations with significant human, environmental and economic consequences. This work presents an application of the two-dimensional hydrodynamic model HEC-RAS to simulate the flood that occurred in May 2024, the most significant since the historical event of 1941. The modeling domain covers Laguna dos Patos, with spatial discretization of 250 m in open areas, 100 m in rivers and 12.5 m in urbanized areas, focusing on the southern portion of the lagoon. The formulation is based on the diffusion wave equations, with a fixed time step of 10 minutes. Real-time hydrological and meteorological data were used, including hydrographs upstream of Lake Guaíba and wind fields provided by INMET stations. The simulation allowed for accurate estimation of the arrival of the first flood peak, water levels and the extent of flooded areas, highlighting the crucial role of spatial variation in Manning's roughness coefficient in representing lagoon dynamics. The results were validated based on official flood maps provided by local agencies. The model demonstrated satisfactory performance, with the capacity to support public managers' decisions related to evacuation routes, resource allocation and impact mitigation strategies.

Resumo: Eventos atmosféricos extremos têm provocado impactos severos no Rio Grande do Sul, resultando em alagamentos e inundações com consequências humanas, ambientais e econômicas significativas. Este trabalho apresenta uma aplicação do modelo hidrodinâmico bidimensional HEC-RAS para simular a inundação ocorrida em maio de 2024, a mais expressiva desde o evento histórico de 1941. O domínio de modelagem abrange a Laguna dos Patos, com discretização espacial de 250 m em áreas abertas, 100 m nos rios e 12,5 m em zonas urbanizadas, com foco na porção sul da laguna. A formulação baseia-se nas equações de onda de difusão, com passo temporal fixo de 10 minutos. Foram utilizados dados hidrológicos e meteorológicos em tempo real, incluindo hidrogramas a montante do lago Guaíba e campos de vento fornecidos por estações do INMET. A simulação permitiu estimar com precisão a chegada do primeiro pico de cheia, os níveis d'água e a extensão das áreas inundadas, evidenciando o papel crucial da variação espacial do coeficiente de rugosidade de Manning na representação da dinâmica lagunar. A validação dos resultados foi realizada com base em mapas oficiais de inundação disponibilizados por órgãos locais. O modelo demonstrou

1) Universidade Federal de Pelotas, Instituto de Física e Matemática, PPGMMat, quadros99@gmail.com

2) Universidade Federal de Pelotas, PPG em Modelagem Matemática, leonidasariasb@gmail.com

3) Universidade Federal de Pelotas, Instituto de Física e Matemática, PPGMMat, danielabuske@gmail.com

4) Universidade Federal de Pelotas, Centro de Engenharias, PPGRH, tamaraleitzkecaldeira@gmail.com

5) Universidade Federal de Pelotas, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, PPGRH, samuelbeskow@gmail.com

6) Universidade Federal de Pelotas, Centro de Engenharias, PPGAmb, diuliana.leandro@gmail.com

7) Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Meteorologia, PPGMet, douglasdasilva.lindemann@gmail.com

8) Universidade Federal de Pelotas, Departamento de Economia, PPGOM, rodrigonobrefernandez@gmail.com

9) Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Física, danielcae@gmail.com

10) Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Meteorologia, CPPMet, henrique.repinaldo@gmail.com

11) Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Meteorologia, PPGMet, mateus.teixeira@gmail.com

desempenho satisfatório, com capacidade de apoiar decisões dos gestores públicos relacionadas a rotas de evacuação, alocação de recursos e estratégias de mitigação de impactos.

Palavras-Chave – Modelagem hidrodinâmica, mancha de inundação, Laguna dos Patos

1. INTRODUÇÃO

O Rio Grande do Sul tem vivenciado, de forma recorrente, eventos extremos associados às mudanças climáticas, com destaque para precipitações intensas, enchentes e inundações que afetam desde áreas serranas e centrais até regiões de planície e zonas costeiras. As inundações registradas em maio de 2024 constituíram um marco na história hidrológica do estado, superando os registros históricos de 1941 em diversas localidades e causando impactos severos à infraestrutura, ao meio ambiente e à população. Em um cenário de emergência prolongada, mais de 90% dos municípios gaúchos decretaram situação de calamidade ou emergência, exigindo respostas rápidas, articuladas e baseadas em conhecimento técnico-científico.

No sul do estado, a elevação do nível da Laguna dos Patos, maior laguna da América do Sul, provocada pelo acúmulo de águas provenientes das bacias dos rios Jacuí, Taquari-Antas, Caí, Sinos e Guaíba, aliada à persistência de ventos de sul e à maré meteorológica, resultou em inundações significativas nos municípios de sua margem meridional. Pelotas, uma das cidades mais populosas da região, foi fortemente atingida, especialmente em bairros com baixa cota altimétrica, como o Laranjal e a Colônia Z3. Mais de 100 mil pessoas foram evacuadas, sem registro de vítimas fatais, resultado da ação coordenada entre universidades, Defesa Civil, poder público e comunidade científica.

Neste contexto, pesquisadores da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), atuando de forma voluntária e interdisciplinar, desenvolveram simulações hidrodinâmicas com o objetivo de prever a propagação das águas, estimar a extensão das áreas alagadas, o tempo de chegada da cheia e os níveis máximos de inundação. A atuação da equipe se deu dentro da Sala de Situação integrando meteorologistas, matemáticos, hidrólogos, engenheiros e especialistas em diversas áreas, em articulação direta com a Defesa Civil Municipal, a Sala de Situação Estadual e outras instituições científicas.

Este artigo apresenta os resultados da simulação da inundação de maio de 2024 no sul da Laguna dos Patos, com foco na região de Pelotas, utilizando o modelo bidimensional HEC-RAS 2D. A modelagem visa não apenas avaliar a resposta do sistema hidrológico a este evento extremo, mas também demonstrar o potencial da modelagem numérica como ferramenta de apoio à tomada de decisão e à gestão de riscos hidrometeorológicos em contextos de crise climática.

2. METODOLOGIA

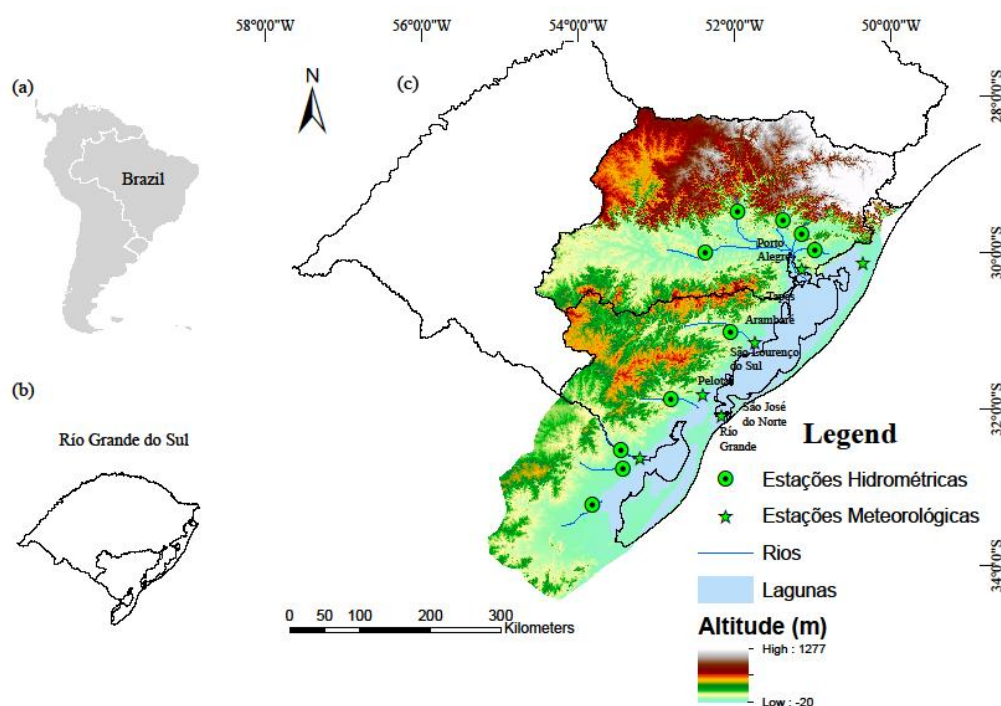
2.1 Área de estudo

A área de estudo está situada no extremo sul do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, abrangendo a porção meridional da Laguna dos Patos, com foco nos entornos do município de Pelotas. A Laguna dos Patos é a maior laguna da América do Sul, com mais de 10.000 km² de área, estendendo-se entre os paralelos 30° e 32° S. A região apresenta relevo predominantemente plano e baixa altitude, com trechos urbanos localizados em cotas inferiores a 2 metros acima do nível médio da laguna, o que acentua sua suscetibilidade a inundações causadas tanto por excesso de vazão fluvial quanto por ventos e maré meteorológica.

A laguna funciona como corpo receptor de grandes bacias hidrográficas do centro-norte do estado, incluindo os rios Jacuí, Taquari-Antas, Caí, Sinos e Guaíba. Durante eventos extremos, como

o ocorrido em maio de 2024, o escoamento acumulado dessas bacias pode gerar volumes expressivos na laguna, cuja drenagem para o Oceano Atlântico depende de condições hidrodinâmicas favoráveis na sua barra sul. A laguna também está conectada à Lagoa Mirim por meio do canal São Gonçalo e, além das águas do lago Guaíba é alimentada pelos rios Camaquã e Piratini, este último drenando suas águas para o canal São Gonçalo. Já na Lagoa Mirim, os principais rios afluentes são o Arroio Grande, Jaguarão, Tacuari e Cebollati (Figura 1).

Figura 1 – Localização da área de estudo no Brasil (a) na América do Sul, (b) no Estado do Rio Grande do Sul e (c) Relevo das bacias dos rios afluente à Laguna dos Patos e à Lagoa Mirim. Fonte: Dos Autores.



O clima da região é do tipo subtropical úmido (Cfa, segundo Köppen), com verões quentes, invernos relativamente amenos e chuvas bem distribuídas ao longo do ano. A presença frequente de sistemas frontais e a influência de ventos persistentes, especialmente de sul e sudeste, contribuem para a elevação do nível da laguna e a intensificação de eventos de inundação, sobretudo quando coincidem com grandes volumes fluviais.

2.2 Modelagem hidráulica

O software *River Analysis System* (HEC-RAS), desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* do *U.S. Army Corps of Engineers*, é um modelo numérico de simulação hidráulica utilizado para calcular escoamentos permanentes, quase-permanentes e não permanentes, tanto unidimensionais quanto bidimensionais, abrangendo regimes subcríticos, críticos e supercríticos. O Ras Mapper do HEC-RAS permite a integração com Sistemas de Informação Geográfica (GIS), possibilitando a criação e visualização de mapas de planícies de inundação a partir de um modelo de terreno e dados hidrometeorológicos de entrada (Manual V 6.5, 2024).

Para o modelo de terreno no domínio da área de estudo, foi elaborada uma malha computacional discretizada com elementos poligonais de diferentes resoluções: 250 m na laguna, 100 m nos rios, 50 m no canal São Gonçalo e 12,5 m na cidade de Pelotas e cidades ribeirinhas. Para a

realização dos cálculos de fluxo no ambiente do HEC-RAS, no período de 20 de abril a 30 de junho de 2024, foram utilizadas na malha as equações de onda de difusão (DWE), com um passo de tempo fixo de 10 minutos, descrita por:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (B \nabla z_s) + q \quad (1)$$

onde $B = \frac{R^{2/3} h}{\eta |\nabla z_s|^{1/2}}$; $V = \frac{R^{2/3} \nabla z_s}{\eta |\nabla z_s|^{1/2}}$; $\frac{\eta^2}{R^{2/3}} |V| V = -\nabla z_s$; V é o vetor velocidade de onda (celeridade); R é o raio hidráulico; ∇z_s é o gradiente do estágio de água e η é o coeficiente de rugosidade de Manning.

Para evitar a instabilidade no modelo em relação ao passo de tempo computacional, foi utilizada a equação do número de Courant, expressa na seguinte forma:

$$C = V \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (2)$$

onde Δt representa a variação temporal (em segundos) e Δx a variação espacial (em metros).

Os dados utilizados na modelagem hidráulica incluem a representação do terreno e dos corpos hídricos por meio de um modelo digital de elevação (DEM), um mapa de uso do solo para determinação do coeficiente de rugosidade " η " de Manning, hidrogramas obtidos a partir de dados hidrológicos e informações meteorológicas sobre o vento, que influenciam o deslocamento das águas na laguna. A Tabela 1 apresenta a descrição dos dados empregados na modelagem hidráulica.

Tabela 1 – Dados para a modelagem hidráulica.

Tipo de dados	Resolução	Descrição
Topografia (DEM)	12,5m	ALOS PALSAR Digital Elevation Model
Mapa de Uso de Solo	10m	Sentinel 2
Hidrologia (hidrogramas)	abril - junho, 2024	ANA – Agência Nacional de Águas
Meteorologia (ventos)	abril - junho, 2024	INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

Para a entrada das águas fluviais na Laguna dos Patos, foram considerados dados hidrológicos por telemetria com intervalos de tempo de 15 minutos a montante do Lago Guaíba, em Porto Alegre, abrangendo os rios Jacuí, Taquari, Caí, dos Sinos e Gravataí.

Na Laguna dos Patos, os dados considerados apresentaram diferentes intervalos de tempo: no rio Camaquã, o intervalo foi de 12 horas; na chegada das águas do canal São Gonçalo, provenientes da Lagoa Mirim, foram utilizados dados de telemetria dos rios Jaguarão (15 minutos), Piratini (12 horas), Tacuari (12 horas) e Cebollati (1 hora).

Os hidrogramas na entrada da Laguna dos Patos, em Porto Alegre, e no sistema Patos-Mirim para cada um dos cursos de água foram extrapolados até sua foz com base na proporção das áreas de drenagem antes da simulação hidrodinâmica.

Além disso, foram inseridas informações referentes aos hidrogramas dos principais cursos d'água propagados até seus deltas na entrada da Laguna dos Patos, Lagoa Mirim e Canal São Gonçalo. Os dados meteorológicos utilizados no modelo, foram a velocidade e direção do vento para o período de 20 de abril a 30 de junho de 2024, segundo informações do Instituto Nacional de Meteorologia.

Foi realizada a modelagem hidrodinâmica bidimensional na Laguna dos Patos, com os dados inseridos em tempo real, permitindo estimar a data de chegada do primeiro pico da enchente do

Guaíba na cidade de Pelotas. A calibração do modelo foi conduzida com o deslocamento da vazão pico registrada em 5 de maio de 2024 no Guaíba, em Porto Alegre, bem como dos rios contribuintes da Laguna dos Patos e da Lagoa Mirim, por meio do Canal São Gonçalo, até sua chegada a Pelotas. Para isso, os coeficientes de rugosidade de Manning foram ajustados com base nos estudos de Hillman (2014) e a mancha de inundação simulada foi comparada com a inundação observada, conforme os mapas de inundação disponibilizados pela Prefeitura de Pelotas (Leandro *et al.*, 2024)).

Com base nisso, foi estimado o Índice de Sucesso Crítico (C) (Wing *et al.*, 2017; Wood *et al.*, 2016). Esse índice foi calculado a partir da comparação entre a extensão da inundação modelada e a inundação observada na cidade de Pelotas, na Colônia de Pescadores Z3 e no Bairro Laranjal, e representado por:

$$C = \frac{M_u O_u}{M_u O_u + M_s O_u + M_u O_s} \quad (3)$$

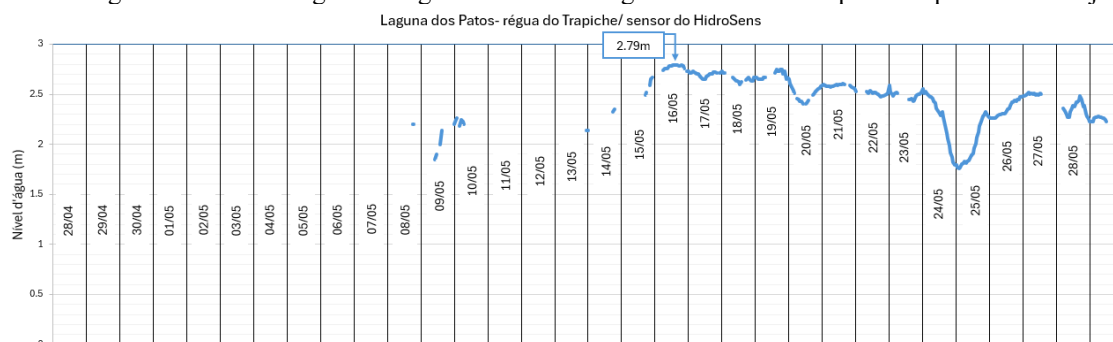
onde M e O representam, respectivamente, as áreas de inundação modelada e observada; os subíndices u e s referem-se às áreas úmida e seca, respectivamente; o valor de C varia entre 0 e 1, sendo que 0 indica ausência de coincidência e 1 indica coincidência perfeita.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A simulação realizada teve como objetivo estimar a chegada das águas do primeiro pico da inundação do Guaíba que ocorreu em 5 de maio de 2024. De acordo com a modelagem, a inundação atingiu o Laranjal e a Colônia de Pescadores Z3 em 12 de maio e a cidade de Pelotas em 13 de maio.

Para o Laranjal e a Colônia de Pescadores Z3, a referência utilizada foi a leitura da régua de níveis de água instalada no Trapiche - Laranjal, localizado à margem da Laguna dos Patos (Figura 2). A medição registrou nível de 2,79 m no dia 16 de maio. Não houve registro no dia 12 de maio devido à inoperância do sensor, que foi danificado pela força da água e os fortes ventos.

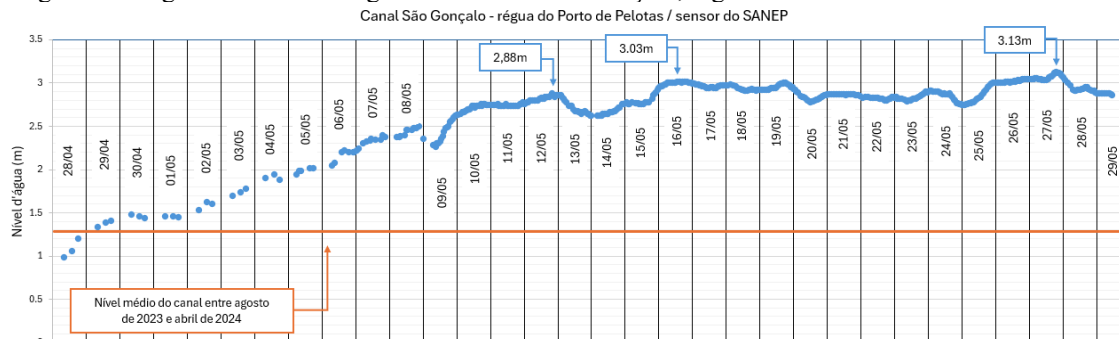
Figura 2 – Registro do nível de água na Laguna dos Patos. Régua instalada no Trapiche da praia do Laranjal.



Na cidade de Pelotas, a data da inundação simulada foi confirmada a partir das medições realizadas no Canal São Gonçalo, cuja régua de nível fica no Porto-Pelotas (Figura 2b). Os registros indicaram níveis de 2,88 m no dia 12 de maio (equivalente à histórica inundação de 1941), 3,03 m no dia 16 de maio (associado ao repique das águas após atingirem a saída para o oceano) e 3,13 m no dia 27 de maio (relacionado ao segundo pico de inundação do Guaíba).

No dia 27 de maio, o nível da água em Porto-Pelotas foi superior ao do Laranjal. Esse fenômeno é atribuído ao maior fluxo de água proveniente da Lagoa Mirim pelo Canal São Gonçalo, aliado à influência dos ventos de leste e sudeste, que ocasionaram o efeito de remanso no local.

Figura 3 – Registro do nível de água no canal de São Gonçalo, régua instalada no Porto de Pelotas.



Destaca-se que a mancha de inundação simulada para Pelotas, Laranjal e Colônia de Pescadores Z3 corresponde aos mapas de inundação disponibilizados pela Prefeitura de Pelotas, conforme ilustrado nas Figuras 4 e 5 a seguir.

Figura 4 – Cidade de Pelotas a) Antes da inundação e b) Inundação (em azul claro) modelada com dique de contenção vs inundação observada (em rosa, mapeadas pela Prefeitura de Pelotas).

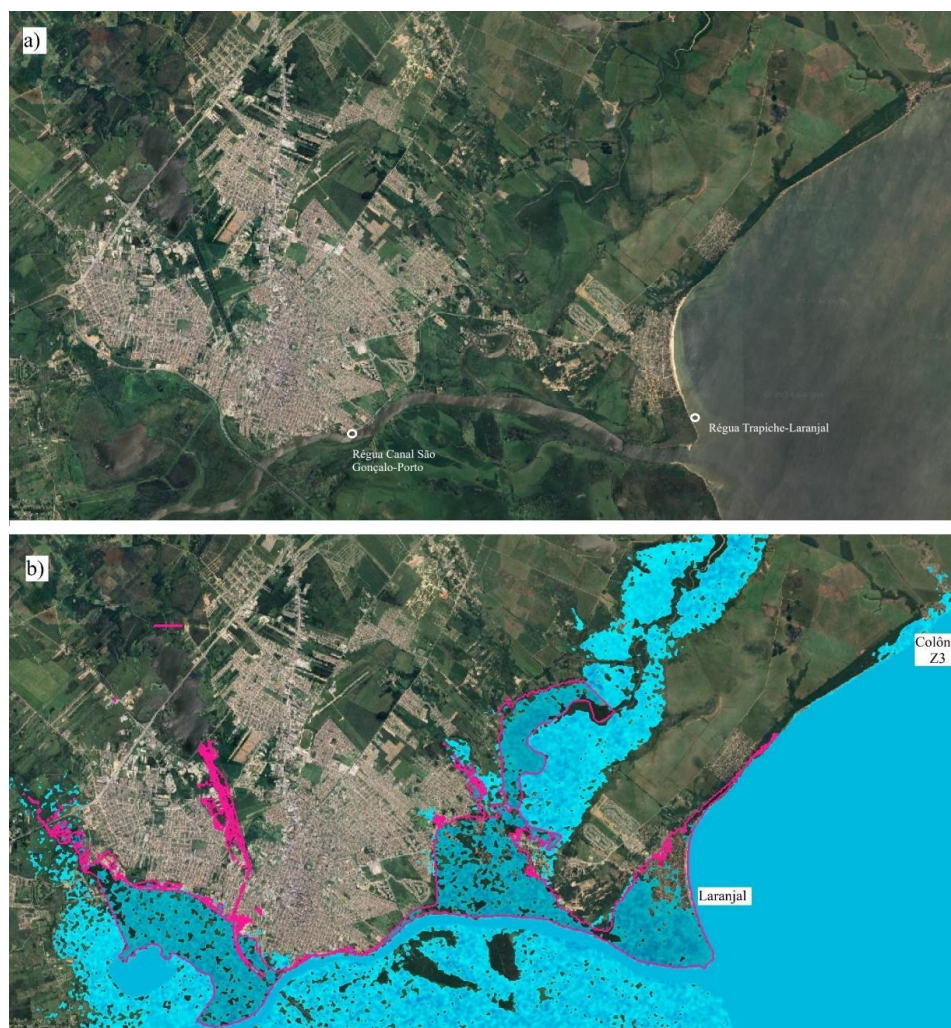
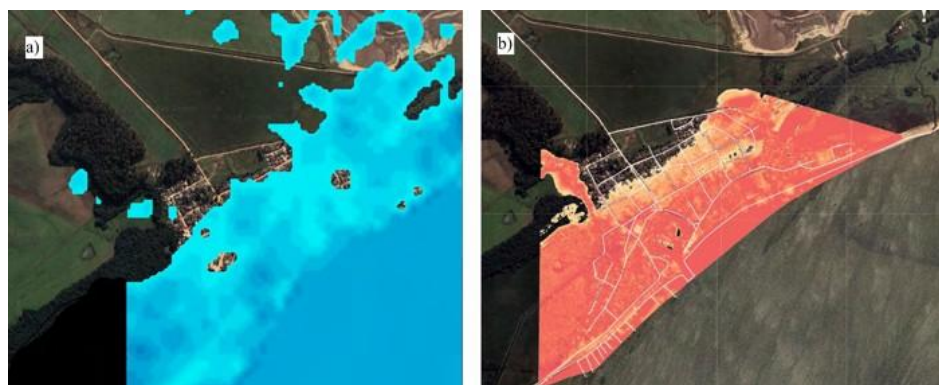


Figura 5 – Colônia de Pescadores Z3 Pelotas a) Inundação modelada vs b) Inundação observada (mapeadas pela Prefeitura).



A comparação entre as áreas de inundação modeladas e observadas resultou em valores do Índice de Sucesso Crítico de 0,75 para o bairro Laranjal, 0,90 para a Colônia de Pescadores Z3 e 0,65 para a cidade de Pelotas. Valores próximos a 1 indicam um bom desempenho do modelo para a área de estudo (Wing *et al.*, 2017).

Ressalta-se que o tempo total de permanência da água na Laguna dos Patos foi de nove dias entre o Guaíba e Rio Grande, um período inferior aos 23 dias estimados por Hillman (2014). Essa diferença deve-se à maior vazão e velocidade do deslocamento da água.

4. CONCLUSÕES

A simulação da inundação ocorrida em maio de 2024 no sul da Laguna dos Patos demonstrou a eficácia da modelagem hidrodinâmica bidimensional com o HEC-RAS como ferramenta preditiva em cenários de crise climática. A partir de dados hidrológicos e meteorológicos em tempo real, foi possível estimar com precisão a chegada da cheia, os níveis máximos de inundação e a extensão das áreas alagadas, contribuindo de forma direta para a gestão de risco e a tomada de decisão no município de Pelotas.

Os resultados obtidos reforçam a importância de se investir em sistemas de previsão operativa, capazes de antecipar cenários de desastre e de orientar ações emergenciais com base em evidências técnico-científicas. A articulação entre universidades, poder público e órgãos de defesa civil foi fundamental para garantir a segurança da população e mitigar os danos do evento extremo, configurando um exemplo bem-sucedido de atuação interdisciplinar.

Conclui-se que a aplicação integrada de modelos numéricos, sensores ambientais e expertise científica é essencial para enfrentar os desafios impostos pelos eventos hidrometeorológicos extremos, que tendem a se intensificar nas próximas décadas. Em especial, para regiões vulneráveis como o entorno da Laguna dos Patos, a continuidade e o aprimoramento dessas abordagens são estratégicos para o planejamento urbano, a adaptação climática e a proteção da vida.

AGRADECIMENTOS

A coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao apoio financeiro parcial deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- HILLMAN, G. (2014). “*Simulação hidrodinâmica bidimensional na Laguna dos Patos, Brasil*”. Mecânica Computacional 32, pp. 2647–2657.
- LEANDRO, D.; CASTRO, A. S.; BESKOW, T. L.; BESKOW, S.; BUSKE, D.; REPINALDO, H. F. B.; TEIXEIRA, M.; QUADROS, R. S. (2024). “*Mapa de simulação de inundação da área urbana de Pelotas para indicar áreas de evacuação no evento de maio de 2024: profundidade de lâminas de água (m)*”
- WING, O. E.; BATES, P. D.; SAMPSON, C. C.; SMITH, A. M.; JOHNSON, K. A.; ERICKSON, T. A. (2017). “*Validation of a 30 m resolution flood hazard model of the conterminous United States*”. Water Resources Research 53 (9), pp. 7968–7986.
- WOOD, M.; HOSTACHE, R.; NEAL, J.; WAGENER, T.; GIUSTARINI, L.; CHINI, M.; BATES, P. (2016). “*Calibration of channel depth and friction parameters in the LISFLOOD-FP hydraulic model using medium-resolution SAR data and identifiability techniques*”. Hydrology and Earth System Sciences 20 (12), pp. 4983–4999.