

ANÁLISE DO RISCO HIDRÁULICO DE INUNDAÇÕES EM BACIAS URBANAS: O Caso da Bacia do Una na cidade de Belém/PA

Elizeu Cordeiro de Souza Neto¹; Érico Gaspar Lisboa¹; Leonardo Augusto Lobato Bello¹.

RESUMO – O objetivo deste trabalho é analisar o risco hidráulico de inundações em bacia hidrográfica urbana, tomando como estudo de caso a Bacia Hidrográfica Urbana do Una (BHU-Una), em Belém/PA. Para isso, adotou-se uma metodologia estruturada em três etapas: (i) formulação do Índice de Risco Hidráulico (IRH), (ii) modelagem hidrológico-hidráulica com discretização espacial da bacia; e, (iii) validação dos mapas pelo conceito “*history matching*”. O IRH foi expresso pela razão entre o volume de alagamento no pico de cheia e o volume total do evento, considerando cenários associados aos tempos de retorno de 5, 20 e 100 anos. Os resultados evidenciaram distribuição espacial heterogênea do risco, com manutenção de núcleos persistentes de alta criticidade em todos os cenários e predominância de áreas de risco moderado e baixo conforme o aumento do tempo de retorno. A validação indicou correspondência entre os setores mapeados como críticos e registros de inundações no inverno amazônico. Conclui-se que o IRH constitui ferramenta útil para apoiar o planejamento urbano-ambiental, a gestão territorial e a definição de áreas prioritárias para intervenção em bacias urbanas amazônicas.

Palavras-Chave – Risco hidráulico; inundações urbanas; bacias urbanas.

ABSTRACT– The aim of this study is to analyse the hydraulic flood risk within an urban catchment, using the Una Urban Catchment (BHU-Una), located in Belém, Pará, Brazil, as a case study. To this end, a three-stage methodology was adopted: (i) formulation of the Hydraulic Risk Index (HRI); (ii) hydrological-hydraulic modelling combined with spatial discretization of the catchment; and (iii) validation of the resulting maps through the history matching concept. The HRI was defined as the ratio between flood volume at peak discharge and the total event volume, under scenarios associated with return periods of 5, 20, and 100 years. The results revealed a heterogeneous spatial distribution of risk, with persistent clusters of high criticalities across all scenarios and a predominance of moderate- and low-risk areas as the return period increased. Validation indicated correspondence between the sectors mapped as critical and recorded flood events during the Amazonian rainy season. It is concluded that the HRI constitutes a useful tool to support urban-environmental planning, territorial management, and the identification of priority areas for intervention in Amazonian urban catchments.

Key-words – Hydraulic risk; urban flooding; urban catchment.

1) Programa de Pós-graduação em Meio ambiente e Desenvolvimento Urbano da Universidade da Amazônia (PPDMU/UNAMA), Avenida Alcindo Cacela, Belém, Pará, Brasil, 26154693@sempreunama.com.br; erico.lisboa@unama.br; leonardo.bello@unama.br.

INTRODUÇÃO

As inundações urbanas constituem um dos principais problemas associados à gestão das águas em cidades brasileiras, sobretudo em áreas de baixa declividade, elevada impermeabilização e ocupação intensa das planícies de inundação. Embora os eventos de cheia estejam relacionados à dinâmica natural das bacias hidrográficas, seus efeitos são ampliados pela urbanização, pela redução da infiltração, pela alteração dos canais naturais, pela obstrução de sistemas de drenagem e pela ocupação de áreas suscetíveis (Tucci, 2008; Canholi, 2015).

Em cidades amazônicas, como Belém/PA, a análise do risco de inundação exige atenção às características hidrológicas, geomorfológicas e urbanas do território. A combinação entre regime pluviométrico intenso, influência de maré, canais retificados, baixa altitude, áreas alagáveis e deficiências de drenagem cria condições favoráveis à recorrência de alagamentos e inundações, especialmente durante o inverno amazônico. Estudos sobre Belém indicam que precipitação, topografia e áreas de várzea exercem influência direta na formação de pontos de alagamento e na distribuição espacial da suscetibilidade urbana (Moreira *et al.* 2019; Pontes *et al.* 2017).

Nesse contexto, a bacia hidrográfica urbana deve ser compreendida como unidade territorial adequada para a análise do risco hidráulico. A leitura por bacia permite integrar forma urbana, drenagem, canais, áreas de armazenamento, padrões de ocupação e processos de escoamento superficial. Além disso, favorece a construção de instrumentos de apoio à decisão capazes de localizar setores prioritários para intervenção, monitoramento, planejamento urbano-ambiental e ordenamento do uso do solo.

Entre os instrumentos possíveis, destacam-se os índices espaciais baseados em parâmetros hidráulico-hidrológicos. O Índice de Risco Hidráulico (IRH), adaptado pela componente *Hydraulic Risk Reduction* (HRR), integrante do *Urban River Restoration Index* (URRIx), permite sintetizar a gravidade hidráulica da inundação por meio da relação entre o volume de alagamento no pico de cheia e o volume total considerado no evento (Veról *et al.* 2019). Essa formulação fornece uma medida adimensional, comparável e passível de espacialização em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Diante disso, este artigo tem por objetivo analisar a aplicação do Índice de Risco Hidráulico (IRH) na Bacia Hidrográfica Urbana do Una, em Belém/PA, considerando cenários associados aos tempos de retorno de 5, 20 e 100 anos. Busca-se, com isso, interpretar a distribuição espacial do risco, identificar áreas de maior criticidade e discutir a utilidade do índice como ferramenta de apoio à gestão de bacias urbanas amazônicas.

METODOLOGIA

A metodologia foi organizada em três etapas principais: (i) formulação do Índice de Risco Hidráulico (IRH); (ii) modelagem hidrológico-hidráulica e discretização espacial da Bacia Hidrográfica Urbana do Una (BHU-Una); e (iii) validação interpretativa dos mapas de risco pelo conceito de *history matching*, mediante comparação entre os padrões simulados e registros históricos de inundações observadas durante o inverno amazônico.

FORMULAÇÃO DO ÍNDICE DE RISCO HIDRÁULICO (IRH)

O IRH adotado neste artigo fundamenta-se na proposta de Veról *et al.* (2019), especialmente no subíndice *Hydraulic Risk Reduction* (HRR), utilizado no URRix para representar a contribuição hidráulica em projetos de controle de cheias e requalificação fluvial urbana. Neste trabalho, o indicador é reorientado para expressar diretamente a gravidade hidráulica da inundação, de modo que valores mais elevados correspondem a maior criticidade. A forma adotada para o índice pode ser expressa pela razão entre o volume de alagamento no pico de cheia e o volume total do evento:

$$IRH = \frac{V_a}{V_t} \quad (1)$$

Onde IRH corresponde ao Índice de Risco Hidráulico. Os termos V_a e V_t representam o volume de alagamento no pico de cheia e o volume total considerado para o evento hidrológico, respectivamente. A razão entre essas grandezas indica a parcela do volume que se manifesta como alagamento superficial em relação ao volume total, permitindo comparar espacialmente diferentes setores da bacia. O volume de alagamento no pico de cheia pode ser associado à lâmina máxima de inundação e à área máxima de armazenamento, conforme a expressão:

$$V_a = v_{m\acute{a}x} A_{arm_m\acute{a}x} \quad (2)$$

Onde $v_{m\acute{a}x}$ se refere a lâmina máxima de inundação. O termo $A_{arm_m\acute{a}x}$ corresponde à área máxima de armazenamento de água na unidade espacial analisada. O volume total (V_t) pode ser estimado a pela intensidade pluviométrica (I), da área de drenagem (A) e do coeficiente de escoamento superficial (C). Convém referir que, para a estimativa da intensidade pluviométrica, recorreu-se a formulação paramétrica destinado ao estado do Pará proposta por Souza *et al.* (2012). Pelos estudos de Alves *et al.* (2025), assumiu-se que a altura pluviométrica média máxima mensal de 320,15 mm. Assim, pela

equação de Souza *et al.* (2012), consideraram-se três cenários: TR=5 anos (associado a projetos de Microdrenagem), TR=20 anos e TR= 100 anos (associado a projetos de Macro-drenagem).

A concepção teórica do risco hidráulico está ilustrada pela Figura 1. Assim é possível compreender que estas formulações se adequam ao estudo de bacias urbanas, uma vez que incorpora, de forma sintética, a influência da impermeabilização, ocupação do solo e capacidade do território de converter chuva em escoamento superficial.

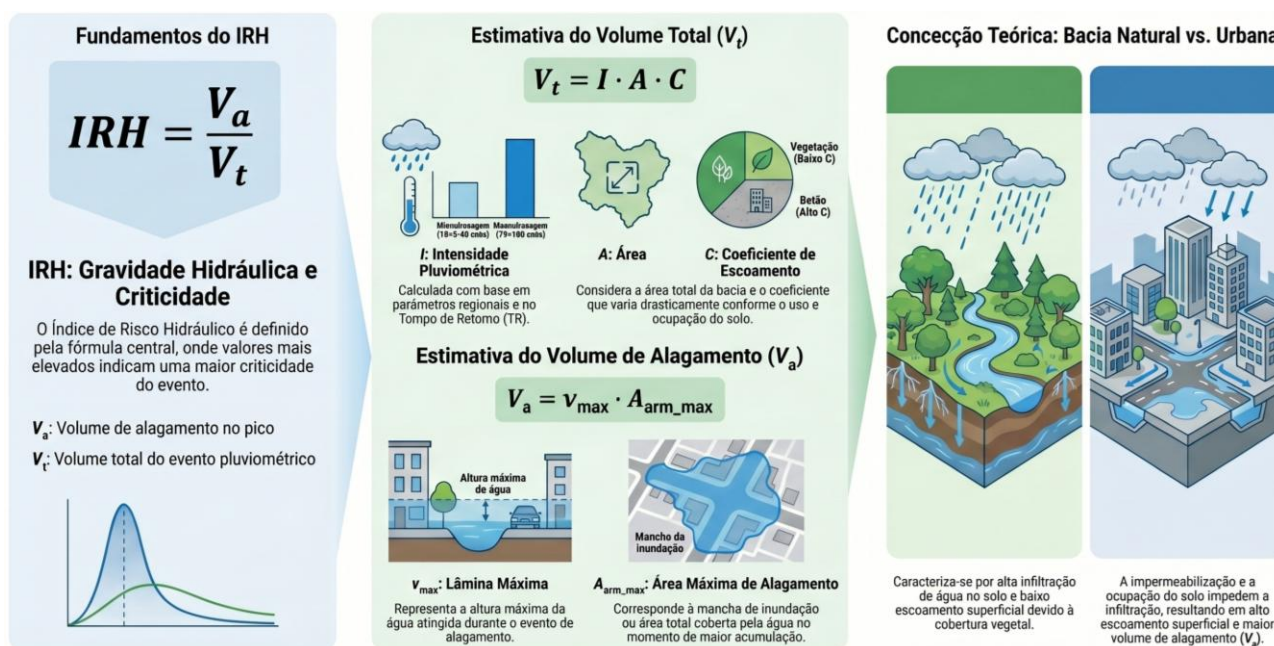


Figura 1: Concepção teórica para avaliação de risco hidráulica em bacias hidrográficas.

MODELAGEM HIDROLÓGICA E DISCRETIZAÇÃO DA BHU-Una

A estimativa do IRH depende de uma representação hidrológico-hidráulica capaz de captar a heterogeneidade espacial da bacia. O uso de modelos do tipo quasi-2D, como o MODCEL, permite representar o funcionamento do sistema urbano por meio de células interligadas, considerando canais, galerias, áreas de armazenamento, superfícies impermeáveis e rotas preferenciais de escoamento (Miguez *et al.* 2017).

Após o cálculo do índice, os valores foram espacializados em ambiente SIG e classificados em três classes de criticidade: baixo (B), moderado (M) e alto (A) risco hidráulico. Essa classificação permitiu gerar mapas temáticos para os cenários de tempo de retorno de 5, 20 e 100 anos, e comparar a distribuição espacial do risco entre eventos de diferentes tempos de recorrências hidrológicas. Este procedimento foi implementado na área da Bacia Hidrográfica Urbana do Una (BHU-Una), localizada na cidade de Belém, capital do Estado do Pará (Figura 2).

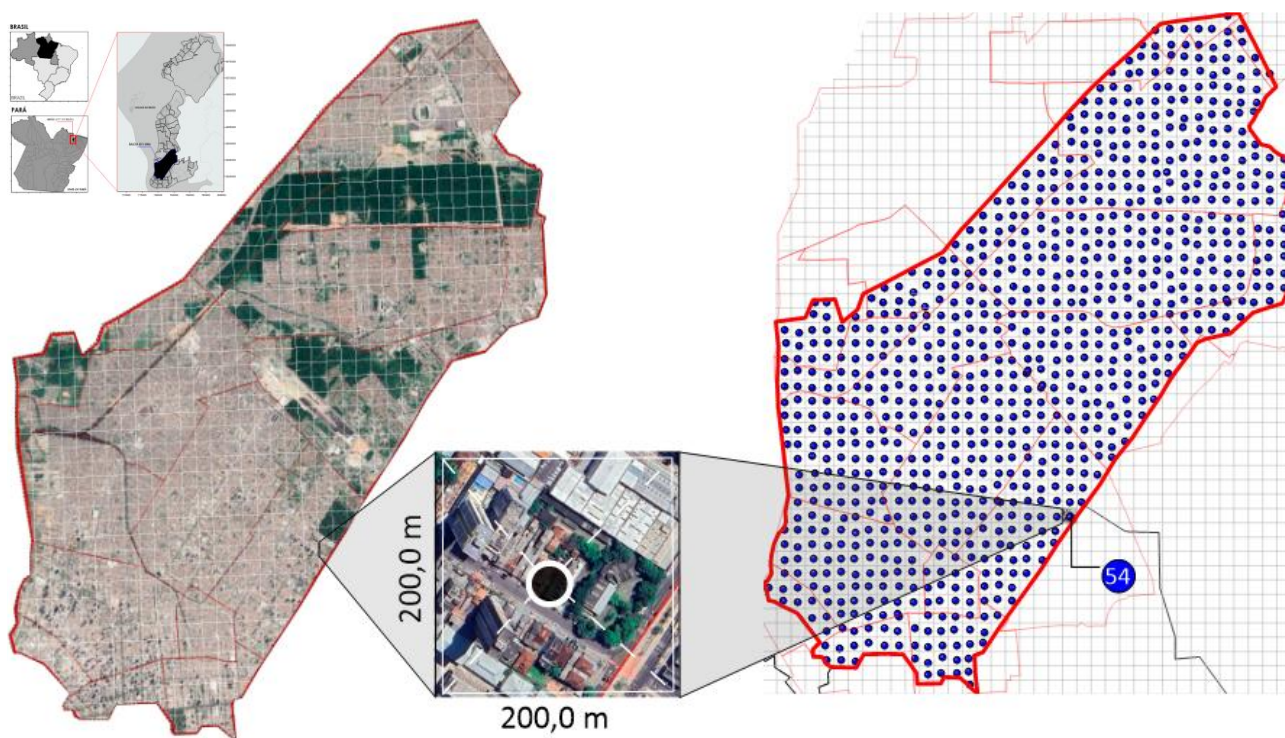


Figura 2: Discretização espacial da área da BHU-Una para aplicação do IRH. Fonte: Autor (2026).

A escolha da BHU-Una justifica-se por quatro aspectos principais: (i) presença de pontos críticos de inundação e alagamento; (ii) existência de intervenções estruturais executadas ou previstas no sistema de drenagem; (iii) disponibilidade de dados censitários e hidrológicos; e, (iv) relevância urbana associada à densidade populacional, à ocupação consolidada e à diversidade de usos do solo.

Considerando que BHU-Una possui aproximadamente 37,66 km² e apresenta áreas alagáveis e sujeitas à influência das marés, o que reforça sua adequação como recorte para análise do risco hidráulico no contexto urbano amazônico, recorre-se a discretização da referida em quadriculas de 200x200 m (40.000,0 m²), onde cada "grid" representa cerca de 0,11% da área total da BHU-Una.

VALIDAÇÃO DOS MAPAS DE RISCO: CONCEPÇÃO “HISTORY MATCHING”

A validação interpretativa foi realizada pelo conceito de *history matching* (Oliver e Chen, 2011), *i.e.*, pela comparação entre os padrões espaciais simulados e os registros históricos de inundações observadas na área de estudo. Esse procedimento não substitui validações hidrométricas detalhadas, mas permite verificar a coerência territorial entre os mapas produzidos e os setores reconhecidos por recorrência de alagamentos no período chuvoso. A comparação com registros de eventos no inverno amazônico contribui para avaliar se as manchas de maior criticidade mapeadas pelo IRH correspondem a áreas efetivamente associadas a problemas de drenagem, baixa capacidade de escoamento ou maior permanência de água no espaço urbano.

RESULTADOS

A aplicação do IRH na Bacia Hidrográfica Urbana do Una evidenciou distribuição espacial heterogênea do risco hidráulico. Em vez de apresentar comportamento uniforme, o índice revelou manchas, corredores e setores de criticidade diferenciada, indicando que a resposta da bacia aos eventos de chuva depende da configuração da drenagem, das cotas altimétricas, da proximidade dos canais, da impermeabilização e do padrão de ocupação urbana.

Observa-se que as áreas de maior criticidade tendem a acompanhar eixos de drenagem e compartimentos urbanos com maior limitação de escoamento. Esse comportamento sugere que o risco hidráulico não se distribui aleatoriamente, mas responde a condicionantes físicos e infraestruturais que permanecem relativamente estáveis no território.

A este respeito, considerando um cenário com TR=5 anos, associado a eventos mais recorrentes, nota-se presença expressiva da classe moderada e ocorrência de núcleos de alta criticidade. Esse resultado é relevante para o planejamento cotidiano da drenagem, pois eventos com maior probabilidade de ocorrência tendem a produzir transtornos recorrentes à mobilidade, à funcionalidade urbana e à qualidade ambiental (Figura 3).

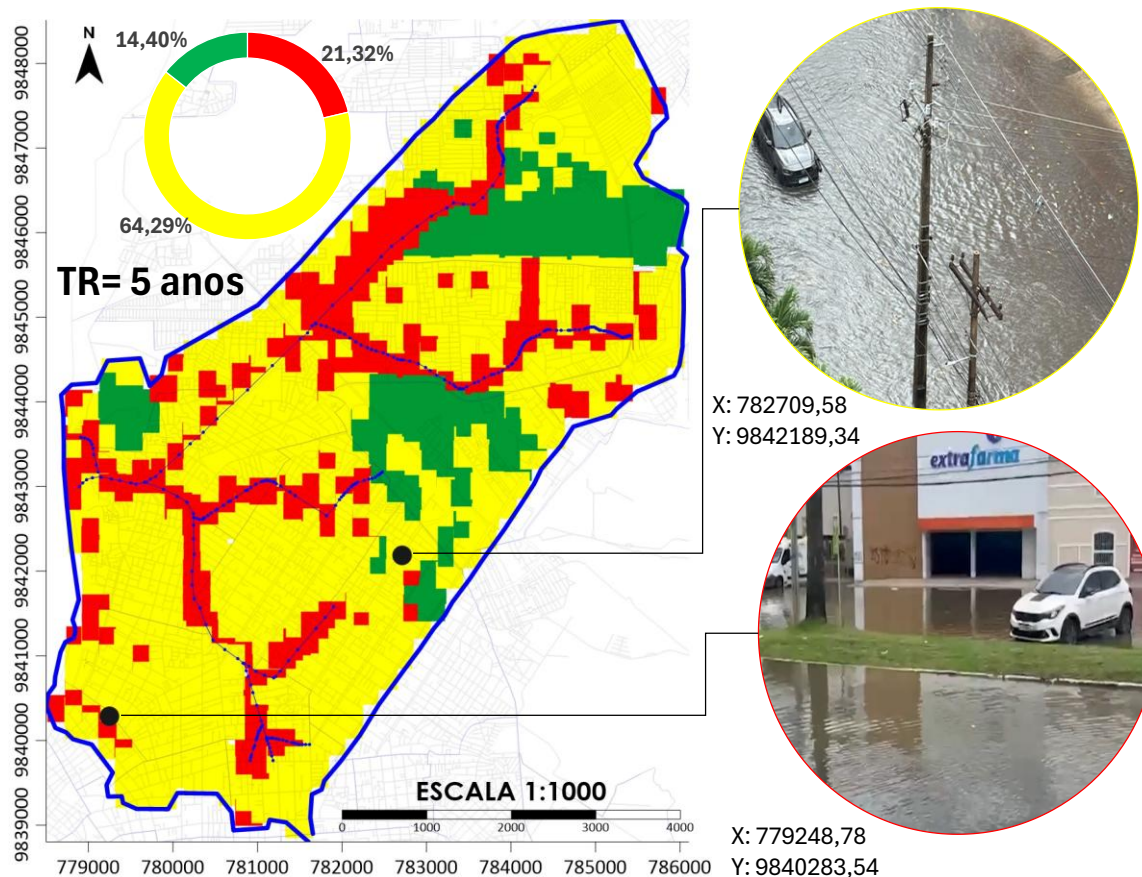


Figura 3: Avaliação e validação do risco hidráulico – Cenário 1 (TR=5anos).

No cenário de TR de 20 anos, o risco passa a apresentar maior diferenciação espacial, com redistribuição das classes e manutenção de setores críticos. A persistência de áreas classificadas como alto risco indica que determinados compartimentos da bacia apresentam criticidade estrutural, menos dependente apenas do tempo de retorno e mais associada às características permanentes do território.

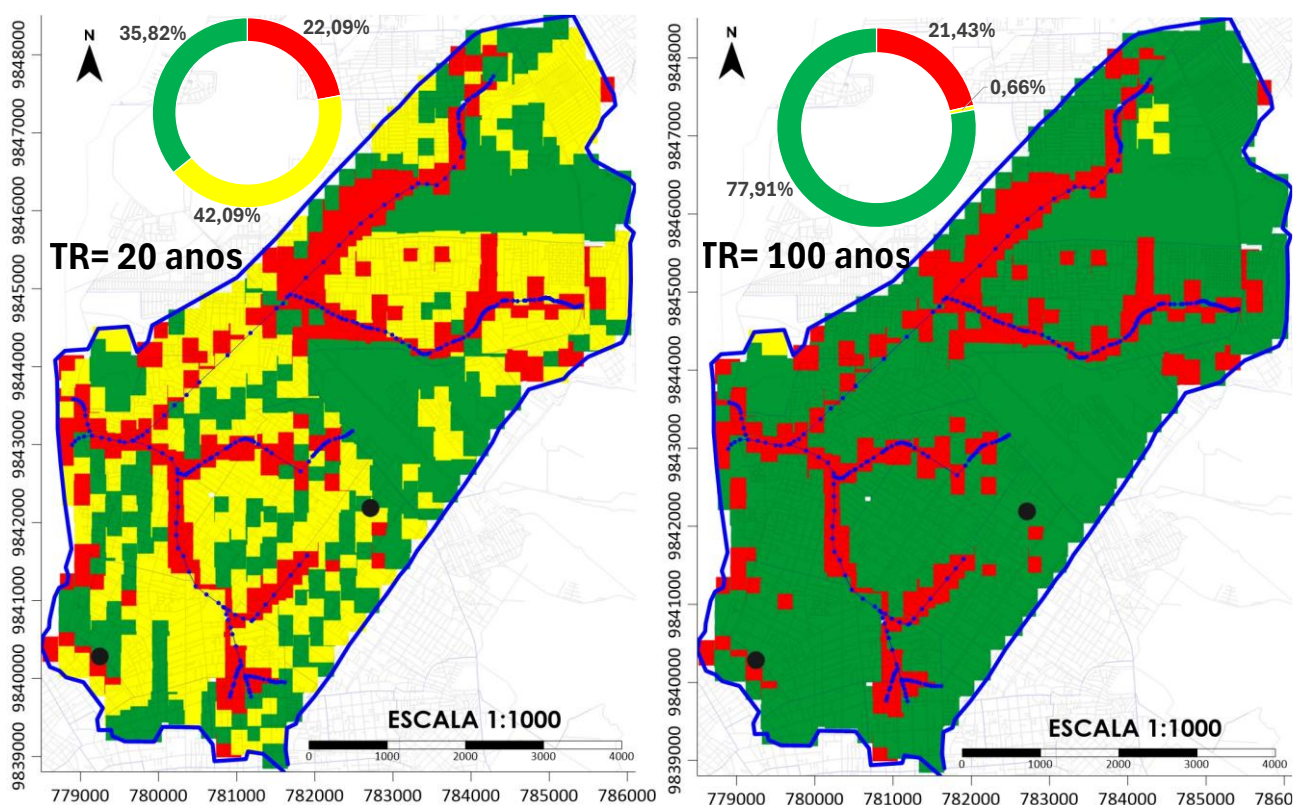


Figura 3: Avaliação do risco hidráulico – Cenário 2 (TR=20anos) e Cenário 3 (TR=100anos).

No cenário de TR de 100 anos, a classe de menor criticidade passa a predominar em parte significativa da área, enquanto a alta criticidade permanece concentrada em setores específicos. Esse comportamento deve ser interpretado considerando a lógica do índice e sua classificação espacial: o resultado não indica ausência de risco, mas a concentração da resposta hidráulica mais desfavorável em áreas que se mantêm sensíveis mesmo em cenário extremo.

A Tabela 1 sintetiza a participação percentual das classes de risco nos três cenários. A leitura conjunta dos mapas e dos percentuais reforça que a classe alta se mantém presente em todos os cenários, próxima de um quinto da área analisada segundo a síntese gráfica. Essa permanência é relevante porque evidencia setores que devem ser priorizados em diagnósticos de drenagem, manutenção de canais, controle de obstruções e implantação de medidas estruturais e não estruturais.

Tabela 1 – Caracterização, definição e ações correspondentes aos graus de prioridade de intervenção.

Cenários	Alto ■		Moderado ■		Baixo ■	
	$0,70 \leq \text{IRH} \leq 1,00$		$0,30 \leq \text{IRH} \leq 0,70$		$0,00 \leq \text{IRH} \leq 0,30$	
TR = 5 anos	21,32%	8,03km ²	64,29%	24,21km ²	14,40%	5,42km ²
TR = 20 anos	22,09%	8,31km ²	42,09%	15,85km ²	35,82%	13,49km ²
TR = 100 anos	21,43%	8,07km ²	0,66%	0,25km ²	77,91%	28,64km ²

A comparação entre os cenários mostra que o IRH permite identificar três padrões territoriais: áreas de menor sensibilidade hidráulica, zonas intermediárias de atenção e núcleos persistentes de alta criticidade. As áreas de menor sensibilidade não deve ser compreendidas como livres de risco, mas como setores que, nas condições simuladas, apresentam menor proporção relativa de volume alagado. As zonas intermediárias demandam monitoramento e medidas preventivas, especialmente por representarem grande parte da área nos cenários de TR de 5 e 20 anos. Já os núcleos de alta criticidade deve ser tratados como áreas prioritárias para intervenção.

A validação por *history matching* contribuiu para reforçar a coerência dos resultados, uma vez que os padrões espaciais do IRH foram comparados com registros de inundações ocorridas no inverno amazônico. Essa aproximação permitiu verificar correspondência entre áreas mapeadas como críticas e setores historicamente associados a alagamentos, fortalecendo a utilidade do índice como instrumento de análise territorial.

Do ponto de vista do planejamento urbano-ambiental, os resultados indicam que a espacialização do IRH pode subsidiar a definição de áreas prioritárias, orientar intervenções de micro e macrodrenagem, apoiar o controle do uso do solo em setores suscetíveis e contribuir para estratégias de mitigação de danos. Em bacias urbanas amazônicas, onde a relação entre chuva, maré, canais e ocupação é particularmente complexa, esse tipo de ferramenta favorece decisões mais integradas e territorialmente fundamentadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do Índice de Risco Hidráulico na Bacia Hidrográfica Urbana do Una permitiu representar espacialmente a distribuição do risco de inundações em diferentes cenários de tempo de retorno. A metodologia mostrou-se adequada para sintetizar a dimensão hidráulica do fenômeno e transformá-la em informação cartográfica útil à gestão urbana.

Os resultados indicaram que o risco hidráulico não se manifesta de forma homogênea no território. Ao contrário, organiza-se em manchas e corredores associados a condicionantes físicos e

urbanos, como baixa declividade, proximidade de canais, limitações de escoamento, impermeabilização e configuração do sistema de drenagem.

A comparação entre os cenários de TR de 5, 20 e 100 anos demonstrou que a permanência de setores de alta criticidade é o elemento mais relevante da análise. Esses setores devem ser compreendidos como áreas prioritárias para investigação detalhada, manutenção de infraestrutura hidráulica, monitoramento e planejamento de medidas de mitigação.

A validação por *history matching* indicou coerência entre os mapas gerados e registros conhecidos de inundações no inverno amazônico, reforçando a capacidade do IRH de representar padrões territoriais compatíveis com a realidade observada na bacia.

Conclui-se que o IRH constitui ferramenta pertinente para apoiar o planejamento urbano-ambiental, a gestão territorial e a tomada de decisão em bacias urbanas amazônicas. Sua aplicação pode contribuir para a definição de áreas prioritárias, o ordenamento do uso do solo, a prevenção de danos e a formulação de políticas públicas de drenagem e saneamento mais ajustadas às especificidades territoriais de Belém/PA.

REFERÊNCIAS

- ALVES, A.R.C; SOUSA, M.D.F; OLIVEIRA, L.L (2025). *Extremos climáticos de chuva (1990 a 2020) em três cidades do Norte do Brasil*. Revista Caderno Pedagógico – Studies Publicações e Editora Ltda., Curitiba, v.22, n.4, p. 01-22.
- CANHOLI, A. P. (2015). *Drenagem urbana e controle de enchentes*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- MIGUEZ, M. G.; BATTEMARCO, B. P.; SOUSA, M. M.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P.; GUSMAROLI, G. (2017). *Urban flood simulation using MODCEL: an alternative quasi-2D conceptual model*. Water, v. 9, n. 6, p. 445. DOI: <https://doi.org/10.3390/w9060445>.
- MOREIRA, F. S. A.; DIAS, G. F. M.; VITORINO, M. I.; SILVA, J. C. C. (2019). *Efeitos da precipitação e topografia para o risco de inundações na cidade de Belém-PA*. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 12, n. 7, p. 2716-2728. DOI: <http://doi.org/10.26848/rbgf.v12.7.p2716-2728>.
- OLIVER, D. S.; CHEN, Y. (2011). *Recent progress on reservoir history matching: a review*. Computational Geosciences, v. 15, n. 1, p. 185-221. DOI: 10.1007/s10596-010-9194-2.
- PONTES, M. L. C.; LIMA, A. M. M.; SILVA JÚNIOR, J. A.; AZEVEDO SADECK, C. C. (2017). *Dinâmica das áreas de várzea do município de Belém/PA e a influência da precipitação pluviométrica na formação de pontos alagamentos*. Caderno de Geografia, v. 27, n. 49, p. 285-3037. DOI: <http://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2017v27n49p285>.
- SOUZA, R. O. R. DE M., SCARAMUSSA, P. H. M., AMARAL, M. A. C. M. DO; PEREIRA NETO, J. A., PANTOJA, A. V., & SADECK, L. W. R. (2012). *Equações de chuvas intensas para o estado*

do Pará. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 16(9), 999–1005.
<https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000900011>

TUCCI, C. E. M. *Inundações urbanas*. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, 2007.

TUCCI, C. E. M. (2008). *Águas urbanas*. Estudos Avançados, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200007>.

VERÓL, A. P. (2013). *Requalificação fluvial integrada ao manejo de águas urbanas para cidades mais resilientes*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

VERÓL, A. P.; BATTEMARCO, B. P.; MERLO, M. L.; MACHADO, A. C. M.; HADDAD, A. N.; MIGUEZ, M. G. (2019). *The urban river restoration index (URRIX): a supportive tool to assess fluvial environment improvement in urban flood control projects*. Journal of Cleaner Production, v. 239, 118058.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), por meio do Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições de Ensino Particulares (PROSUP).