



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Avaliação hidrodinâmica de medidas de controle de cheias na bacia do Rio Jiquiá (Recife-PE) sob cenários de mudanças climáticas

Alisson Caetano da Silva¹ Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral¹ Silvanete Severino da Silva² Anderson Luiz Ribeiro Paiva³ Simone Rosa da Silva⁴

¹Centro de Tecnologia e Geociências-CTG, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife Orcid:0000-0002-8580-3886, PE, Brasil. ¹Centro de Tecnologia e Geociências-CTG, Universidade de Pernambuco (UFPE) e Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (UPE) Orcid:0000-0002-1348-8004, Recife, PE, Brasil. ²Unidade Acadêmica de Belo Jardim, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) <https://orcid.org/0000-0002-3167-0811>, Belo Jardim, PE, Brasil. ³Centro de Tecnologia e Geociências-CTG, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, PE, Brasil <https://orcid.org/0000-0003-3475-1454>. ⁴Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (UPE), Recife, PE, Brasil. E-mail: Alissoncaetanodasilva@hotmail.com (ACS), jaime.cabral@poli.br <https://orcid.org/0000-0001-7138-7546> (JJSPC), silvanete.silva@ufrpe.br (SSS), anderson.paiva@ufpe.br (ALRP), simonerosa@poli.br (SRS)

Artigo recebido em 19/02/2024 e aceito em 06/05/2026

RESUMO

As bacias urbanas costeiras apresentam crescente suscetibilidade a inundações em decorrência da urbanização acelerada e dos efeitos das mudanças climáticas, que intensificam eventos extremos e elevam o nível do mar. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a eficácia de medidas estruturais de controle de cheias na bacia do Rio Jiquiá (Recife-PE), com ênfase na atuação de reservatórios de detenção, por meio de modelagem hidrodinâmica bidimensional. A metodologia baseou-se na aplicação do modelo HEC-RAS 6.4.1 em regime não permanente, utilizando dados de modelo digital do terreno de alta resolução (PE-3D), informações de uso e cobertura do solo (MapBiomas), além de parâmetros hidrológicos como *Curve Number* (CN) e coeficiente de rugosidade de *Manning*, espacialmente distribuídos. Foram incorporadas séries pluviométricas observadas do CEMADEN e condições de contorno associadas aos níveis de maré fornecidos pela DHN. Foram simulados seis cenários hidrodinâmicos: dois atuais (com e sem reservatórios) e quatro futuros (2070–2100), considerando o incremento de 13,26% na precipitação máxima e a elevação de 0,82 m no nível do mar, além de diferentes configurações operacionais de reservatórios, incluindo variação da cota de fundo. O modelo foi calibrado e validado com dados observados em estações fluviométricas, apresentando coeficientes de determinação (R^2) entre 0,61 e 0,88. Os resultados demonstram que os reservatórios de detenção reduzem significativamente as áreas inundáveis, sobretudo quando associados a maior capacidade operacional. Conclui-se que o dimensionamento adequado dessas estruturas, aliado a estratégias compensatórias distribuídas, é fundamental para mitigar inundações e aumentar a resiliência hidrodinâmica da bacia frente a cenários futuros.

Palavras-Chave: Drenagem urbana; Inundações; HEC-RAS 2D; Influência de maré; Resiliência hídrica.

Hydrodynamic evaluation of flood control measures in the jiquiá river basin (Recife-Pe) under climate change scenarios

ABSTRACT

Coastal urban basins are increasingly susceptible to flooding due to rapid urbanization and the effects of climate change, which intensify extreme events and contribute to sea level rise. In this context, this study aimed to evaluate the effectiveness of structural flood control measures in the Jiquiá River basin (Recife-PE, Brazil), with emphasis on the role of detention reservoirs, through two-dimensional hydrodynamic modeling. The methodology was based on the application of the HEC-RAS 6.4.1 model under unsteady flow conditions, using high-resolution digital terrain data (PE-3D), land use and land cover information (MapBiomas), and hydrological parameters such as Curve Number (CN) and Manning's roughness coefficient, spatially distributed across the basin. Observed rainfall data from CEMADEN and tidal boundary conditions provided by the Brazilian Navy Hydrographic Center (DHN) were incorporated into the model. Six hydrodynamic scenarios were simulated: two representing current conditions (with and without reservoirs) and four representing future conditions (2070–2100), considering a 13.26% increase in maximum precipitation and a 0.82 m sea level rise, as well as different reservoir configurations, including variations in bottom elevation. The model was calibrated and validated using observed water level data from monitoring stations, yielding coefficients of determination (R^2) ranging from 0.61 to 0.88. The results indicate that detention reservoirs significantly reduce flood-prone areas, particularly

when associated with increased operational capacity. It is concluded that the proper design of these structures, combined with distributed compensatory strategies, is essential for mitigating flooding and enhancing the hydrodynamic resilience of the basin under future scenarios.

Keywords: Urban drainage; flooding; HEC-RAS 2D; tidal influence; water resilience.

Introdução

Eventos hidrometeorológicos extremos têm se intensificado nas últimas décadas, em decorrência das mudanças climáticas e da variabilidade climática natural, com impactos crescentes em áreas urbanas. O sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas aponta evidências robustas do aumento na frequência e intensidade de precipitações extremas, associado ao aquecimento global e à maior capacidade da atmosfera de reter vapor d'água (IPCC, 2021). Ademais, estudos recentes indicam alterações na distribuição temporal e espacial desses eventos, ampliando a incerteza e a complexidade da gestão de riscos urbanos (Fowler et al., 2021; Fonseca Neto et al., 2022).

No caso de áreas costeiras, esse quadro é agravado pela elevação do nível médio do mar e pela intensificação de marés elevadas; consequentemente, há redução da eficiência dos sistemas de drenagem e aumento da suscetibilidade a inundações, sobretudo em regiões estuarinas e de baixa altitude.

Nesse sentido, a interação entre precipitações intensas, níveis de maré e elevação do nível do mar pode gerar efeitos sinérgicos, ampliando a extensão e a duração dos alagamentos (Bevacqua et al., 2019; Moftakhari et al., 2022), sendo tal dinâmica particularmente crítica em cidades tropicais com urbanização acelerada e planejamento hidrológico insuficiente.

Diante desse cenário, a modelagem hidrológica e hidrodinâmica consolida-se como ferramenta fundamental para a análise e gestão de inundações urbanas. Observa-se, mais recentemente, o avanço de modelos bidimensionais acoplados a dados de alta resolução, capazes de representar com maior fidelidade o escoamento superficial em ambientes urbanos complexos. Nesse contexto, modelos 2D, como o HEC-RAS, têm apresentado desempenho superior na simulação de manchas de inundação, sobretudo quando integrados a cenários climáticos futuros e a condições de contorno dinâmicas, ampliando a capacidade de previsão e suporte à tomada de decisão (Costabile et al., 2020; Bates et al., 2021).

Além disso, esses modelos possibilitam a integração de múltiplas fontes de inundação, como processos fluviais, costeiros e influenciados por

maré, proporcionando uma abordagem mais abrangente e realista das dinâmicas hidrológicas em áreas costeiras urbanizadas. Essa capacidade integrada permite uma melhor compreensão dos mecanismos de inundação e maior robustez na avaliação de cenários de risco, especialmente em contextos sujeitos a eventos extremos e à elevação do nível do mar (Tange Gallien, 2023).

No Brasil, os impactos são potencializados por um processo de urbanização frequentemente associado à ocupação de áreas suscetíveis a inundações. Assim, a impermeabilização do solo, aliada à insuficiência dos sistemas de drenagem, contribui para o aumento do escoamento superficial e dos picos de vazão. Estudos recentes apontam a crescente vulnerabilidade das cidades brasileiras a eventos extremos, em função da combinação entre expansão urbana desordenada e mudanças climáticas (Marengo *et al.*, 2021; Vasconcelos, 2022). Ademais, projeções climáticas indicam a intensificação das chuvas em diversas regiões, com implicações diretas para o planejamento urbano.

Nesse contexto, Recife destaca-se pela elevada vulnerabilidade a inundações, decorrente de sua baixa altitude, elevada densidade populacional e forte influência das marés, fatores que dificultam o escoamento pluvial. Embora haja avanços recentes na aplicação de modelos hidrodinâmicos no país, ainda são limitados os estudos que integrem, de forma sistêmica, a modelagem bidimensional em escala de bacia, a influência de condições de jusante associadas ao nível do mar e cenários futuros de mudanças climáticas.

Adicionalmente, persiste uma lacuna quanto à avaliação integrada de soluções estruturais, como reservatórios de retenção, sob diferentes configurações operacionais e cenários prospectivos. Evidências recentes indicam que a eficiência dessas estruturas pode variar significativamente quando consideradas condições futuras de precipitação e níveis elevados de maré (Zhou et al., 2022).

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar, por meio de modelagem hidrodinâmica bidimensional, a eficácia de medidas de controle de cheias na bacia do Rio Jiquiá, em Recife, com ênfase na atuação de

reservatórios de detenção na redução das áreas inundáveis, considerando cenários atuais e futuros de mudanças climáticas. Espera-se, assim, contribuir para o aprimoramento do planejamento urbano e para a definição de estratégias de adaptação em bacias costeiras.

Material e métodos

Área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Jiquiá está localizada na porção sudoeste do município do Recife (PE) e integra o sistema de drenagem do Rio Tejiú. A área de drenagem é de aproximadamente 21,2 km², com cerca de 6,5 km de extensão no canal principal, atravessando áreas densamente

urbanizadas dos bairros Jardim São Paulo, Areias, Sancho e Jiquiá, no município do Recife (Prefeitura do Recife, 2020) (Figura 1).

A região apresenta relevo predominantemente plano, com declividades inferiores a 5%, característico da planície costeira recifense, o que favorece o escoamento lento e aumenta a suscetibilidade a inundações. A bacia possui elevada taxa de impermeabilização, trechos canalizados e galerias subterrâneas, além de problemas recorrentes de assoreamento sobretudo nas imediações da BR-101 e da Av. Abdias de Carvalho, onde há redução da seção hidráulica devido à ocupação irregular das margens (Prefeitura do Recife, 2020).

Figura 1. Localização e delimitação da bacia do rio Jiquiá em área urbana de Recife-PE. Fonte: Elaboração dos autores a partir de dados da EMLURB (2016)

Modelagem hidrodinâmica

A simulação hidrodinâmica foi realizada no software HEC-RAS versão 6.4.1 (USACE, 2016), utilizando o módulo bidimensional para escoamento não permanente em regime de superfície livre.

Dados de entrada do modelo

Modelo Digital do Terreno (MDT)

A topografia foi obtida a partir de dados LiDAR do Programa Pernambuco Tridimensional (PE-3D), com resolução espacial de 0,5 m, disponibilizados pela Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco (Figura 2).

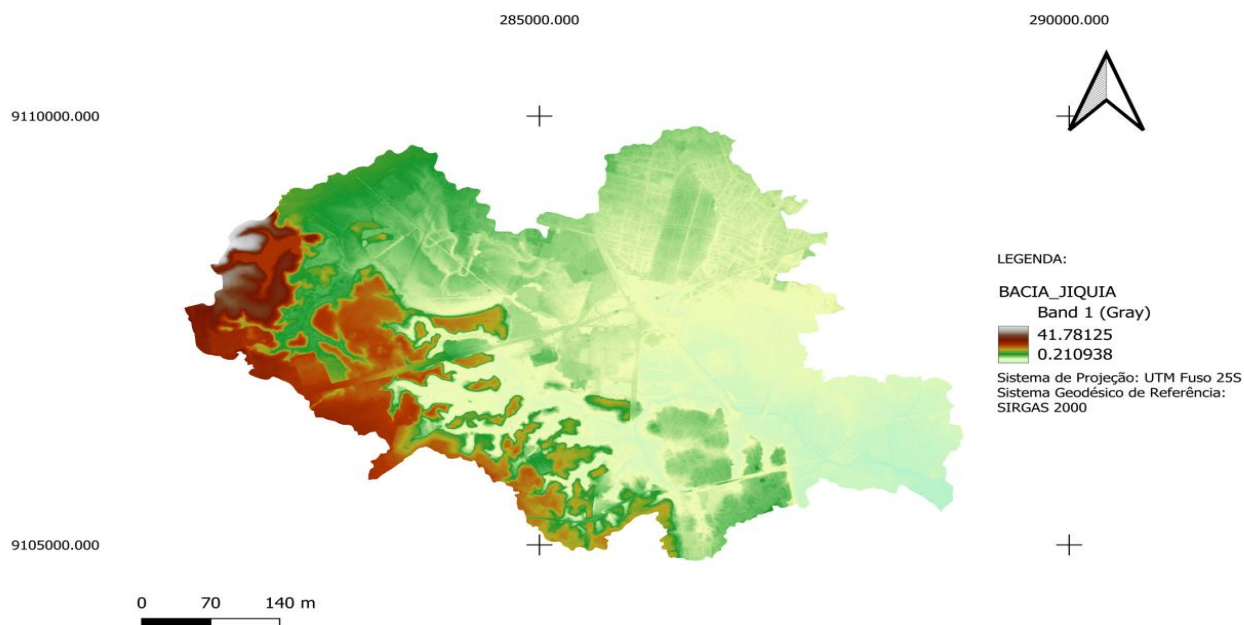


Figura 2. Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia hidrográfica do rio Jiquiá, Recife-PE. Fonte: Elaboração dos autores a partir de dados do PE3D (2025).

Nos eventos simulados em que foram consideradas a implantação de quatro

reservatórios de detenção nas alças da BR-232 com a BR-101, a superfície do terreno foi



editada, estabelecendo-se uma cota de fundo de 3,20 m.

Essa cota foi definida levando em consideração o escoamento por gravidade das

águas retidas nos reservatórios. O volume total de amortecimento dos quatro reservatórios foi de 374.160,00 m³. A Figura 3 apresenta a localização dos reservatórios modelados.

Figura 3. Reservatórios modelados na bacia do Rio Jiquiá, nas alças da BR-232 com a BR-101. Fonte: Os autores (2025).

Uso e ocupação do solo e rugosidade

As classes de uso e cobertura do solo foram obtidas do MapBiomas (2023), com resolução de 10 m. Os coeficientes de rugosidade de *Manning*(n) foram atribuídos conforme valores de referência da literatura (Chow, 1959; USACE, 2016). O valor médio ponderado adotado no modelo foi $n = 0,112$. O uso e a cobertura da terra na bacia do rio

Jiquiá estão apresentados na Figura 4. Observa-se a predominância de áreas de infraestrutura urbana, especialmente nas porções leste e sul da bacia, enquanto remanescentes de vegetação florestal e áreas de mangue concentram-se principalmente na porção oeste.

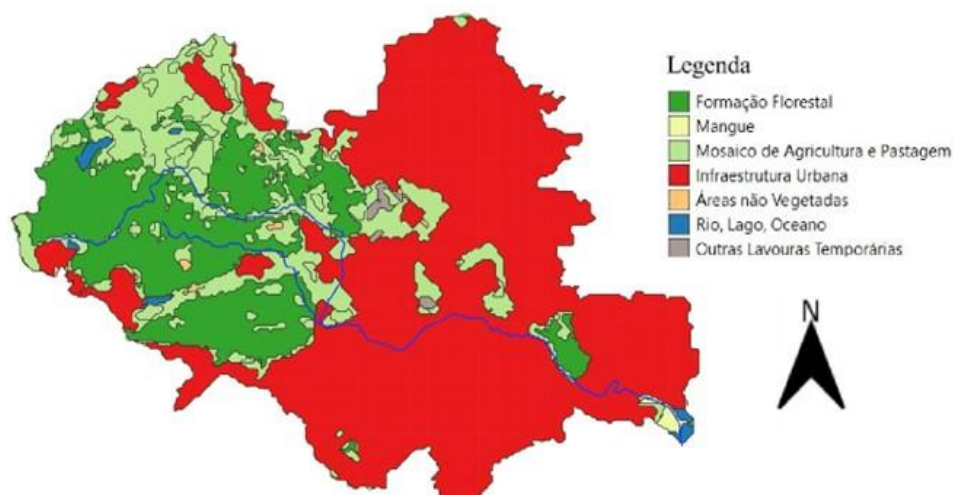


Figura 4. Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Rio Jiquiá, Recife-PE. Fonte: Os autores (2025) a partir dos dados do Mapbiomas (2023).

Os valores do coeficiente de rugosidade de Manning adotados neste estudo foram definidos com base nas classes de uso e ocupação do solo da bacia, conforme apresentado na Tabela 1, utilizando como referência os intervalos recomendados por Chow (1959) e pelo USACE (2016). Destaca-se a predominância da classe

Infraestrutura Urbana, que corresponde a 59,50% da área total (12,62 km²), para a qual foi adotado o valor de $n = 0,16$, compatível com superfícies urbanizadas e com maior resistência ao escoamento.

Tabela 1. Valores de referência de Manning de acordo com o uso e ocupação do solo.

Classe de uso do solo	Percentual de área	Área aprox.[km ²]	Valores de Manning de referência	Valores de Manning adotados
Outras Lavouras Temporárias	0,38%	0,01	0,025 – 0,05	0,03
Mosaico de Agricultura e Pastagem	18,70%	3,96	0,025 – 0,05	0,04
Formação Florestal	20,24%	4,29	0,10 - 0,16	0,10
Infraestrutura Urbana	59,50%	12,62	0,12 – 0,20	0,16
Mangue	0,31%	0,06	0,045 - 0,15	0,10
Rio	0,61%	1,28	0,025 - 0,05	0,03

Fonte: Os autores (2026) a partir de 1) Chow (1959); 2) USACE (2016).

As áreas de formação florestal e de mosaico de agricultura e pastagem representam 20,24% (4,29 km²) e 18,70% (3,96 km²) da bacia, respectivamente, às quais foram associados coeficientes de 0,10 e 0,04. As classes de menor representatividade incluem outras lavouras temporárias (0,38%), mangue (0,31%) e corpos d'água (0,61%), para as quais foram adotados valores compatíveis com suas características de cobertura e resistência hidráulica. O valor médio ponderado de rugosidade foi utilizado como condição inicial do modelo e, posteriormente, ajustado durante o processo de calibração, com o objetivo de melhor representar a dissipação de energia do escoamento e o tempo de propagação da onda de cheia.

Parâmetros de infiltração

No que se refere aos parâmetros de infiltração, o escoamento superficial foi estimado

pelo método *Curve Number* (CN) do *Soil Conservation Service*. Os valores de CN foram obtidos a partir da base otocodificada da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), resultando em um CN médio ponderado igual a 81, indicativo de elevado grau de impermeabilização da bacia.

Durante o processo de calibração, os valores de CN foram ajustados dentro de limites fisicamente plausíveis, visando a melhorar a representação do volume escoado, do pico de vazão e do tempo de resposta hidrológica. Observa-se a predominância de valores elevados de CN na porção oeste da bacia (78 a 91), enquanto a porção leste apresenta valores inferiores (≤ 72), associados a áreas com maior cobertura vegetal e maior capacidade de infiltração (Figura 5).

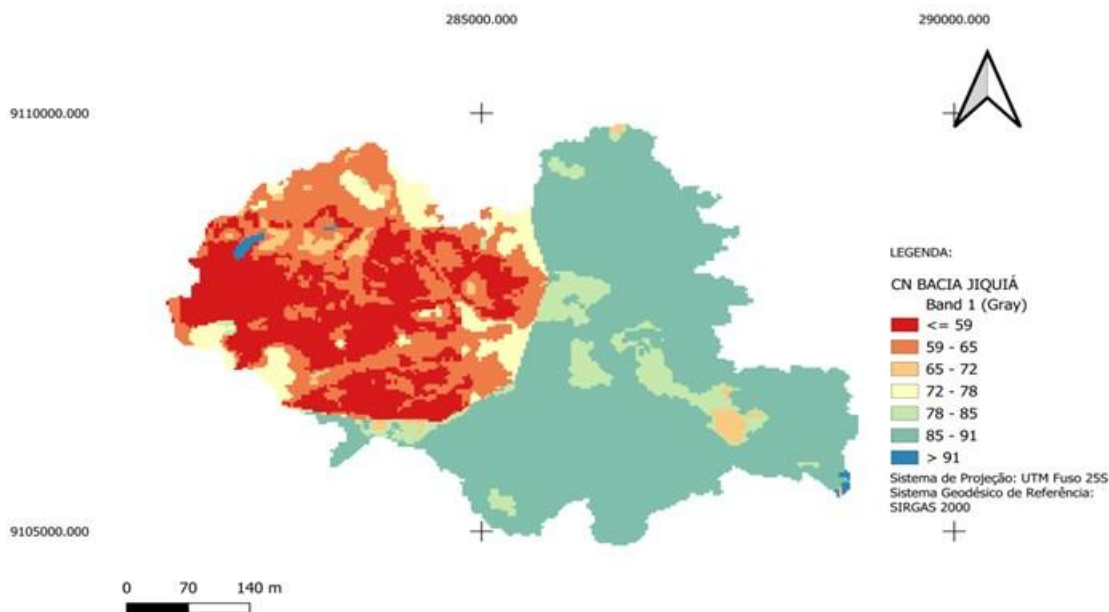


Figura 5. Classes de CN associadas às condições de uso do solo e permeabilidade na bacia do rio Jiquiá, Recife-PE.

Fonte: O autor (2025) a partir dos dados da ANA (2025).

Condições de jusante (maré)

Os níveis de maré foram obtidos da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), referentes ao Porto do Recife, com interpolação horária. Os dados foram ajustados ao referencial altimétrico do IBGE (+1,14 m). Para os cenários futuros, considerou-se a elevação de 0,82 m no nível médio do mar, com base no cenário RCP 8.5 do Intergovernmental Panel on Climate Change (2014).

Reservatórios de retenção

Inicialmente, foram modelados quatro reservatórios implantados nas alças de interseção entre a BR-232 e a BR-101, os quais totalizam um volume de amortecimento de 374.160 m³. Para os cenários principais, adotou-se uma cota de fundo de 3,20 m, de modo a permitir o escoamento por gravidade. Por outro lado, em cenários adicionais, consideraram-se reservatórios com cota de fundo reduzida para 1,50 m, possibilitando a análise de diferentes condições hidráulicas.

Discretização espacial e condições de contorno

No que se refere à discretização espacial, a malha computacional foi estruturada com células quadradas de 10 m. Ademais, realizou-se um refinamento local de até 1 m na região do canal principal, com o objetivo de melhorar a representação dos processos hidrodinâmicos. Quanto às condições de contorno, adotaram-se, simultaneamente, a precipitação distribuída espacialmente em toda a bacia e a variação do nível de maré no exutório do rio Jiquiá no rio Tejiú, assegurando, assim, maior realismo às simulações.

Calibração e validação

No processo de calibração, utilizou-se o evento ocorrido entre 14 e 16 de maio de 2025, com base nos registros de nível d'água das estações Capetinga e Fábrica Yolanda. Nesse contexto, os parâmetros ajustados foram o coeficiente de Manning e o Curve Number (CN), por meio de procedimento iterativo, visando à minimização das discrepâncias entre os dados observados e simulados. Em seguida, o desempenho do modelo foi avaliado a partir do coeficiente de determinação (R^2), sendo classificados como insatisfatórios valores inferiores a 0,5, satisfatórios entre 0,5 e 0,6, bons entre 0,6 e 0,7 e, por fim, ótimos entre 0,7

e 1,0, conforme estabelecido por Moriasi et al. (2007). A Equação correspondente é apresentada a seguir:

$$R^2 = \frac{\sum(Y_{obs} - Y_{médiaobs})(Y_{sim} - Y_{médi asim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{médiaobs})^2 (Y_{sim} - Y_{médi asim})^2} \quad (1)$$

Posteriormente, a validação do modelo foi realizada com base no evento compreendido entre 3 e 10 de fevereiro de 2025, caracterizado por uma precipitação acumulada de 222,45 mm e uma preamar máxima de 2,4 m. Ressalta-se que, nesse procedimento, foram mantidos os parâmetros previamente calibrados (Agência

Pernambucana de Águas e Clima, 2025), garantindo consistência metodológica.

Por fim, a localização das estações de monitoramento hidrológico ao longo do rio Jiquiá é apresentada na Figura 6. Observa-se, nesse sentido, a distribuição espacial de dois pontos de controle: a estação Capetinga, situada a montante, e a estação Fábrica Yolanda, localizada a jusante. Tais pontos foram selecionados devido à sua representatividade hidrológica e, consequentemente, por possibilitarem a análise da dinâmica do escoamento ao longo do canal principal em um trecho caracterizado por elevado grau de urbanização.



Figura 6. Mapa de localização das Estações de monitoramento de nível do Rio Jiquiá, Recife-PE. Fonte: Elaboração dos autores a partir de imagem do Google Earth (2025) e dados das estações de monitoramento.

Cenários de simulação

Foram simulados seis cenários hidrodinâmicos no HEC-RAS 2D, correspondendo a três condições atuais e três futuras de precipitação e maré, contemplando a ausência de reservatórios e duas configurações de reservatórios de retenção com diferentes cotas de fundo, com o objetivo de avaliar o desempenho das estruturas projetadas para o presente e para um horizonte temporal de até 75 anos.

Assim, os cenários hidrológicos considerados neste estudo são apresentados na Tabela 3, contemplando diferentes combinações de condições de precipitação, nível médio do mar e operação de reservatórios. Os cenários C1 e C2 representam a condição atual, diferenciando-se

apenas pela ausência e pela presença de reservatórios, respectivamente.

Para a avaliação de impactos futuros, os cenários C3 e C4 consideram o horizonte de 2070 a 2100, incorporando um aumento de 13,26% na precipitação máxima, valor adotado com base em projeções de mudanças climáticas que indicam a intensificação de eventos extremos de chuva no Nordeste brasileiro. Estudos de *downscaling* climático apontam incrementos típicos entre 10% e 20% na intensidade das precipitações extremas sob cenários de altas emissões, o que justifica a adoção de um valor intermediário e conservador dentro dessa faixa (Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2014; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014).

A elevação do nível médio do mar de 0,82 m foi definida conforme projeções do cenário RCP 8.5 do Intergovernmental Panel on Climate Change (2014), compatível com estimativas para o final do século XXI, especialmente em regiões costeiras tropicais. Esses cenários foram simulados com e sem a operação de reservatórios, permitindo avaliar a resposta hidrodinâmica da bacia sob condições críticas futuras.

Adicionalmente, os cenários C5 e C6 incorporam reservatórios com cota de fundo (C.F.) de 1,50 m, valor definido com base em critérios de otimização hidráulica e aumento do volume útil de armazenamento. Essa configuração visa potencializar a capacidade de amortecimento dos picos de cheia, sendo aplicada tanto às condições

atuais quanto às futuras, o que possibilita analisar a efetividade do incremento da capacidade operacional dessas estruturas na mitigação dos impactos hidrológicos.

Essa abordagem possibilita a análise comparativa entre condições atuais e projeções futuras, bem como a avaliação da eficiência dos reservatórios como medida de adaptação frente às mudanças climáticas e à elevação do nível do mar. Além disso, os reservatórios foram projetados para operar por gravidade, sem necessidade de bombeamento.

Tabela 3. Cenários simulados no modelo hidrodinâmico

Cenário	Precipitação máxima	Altura do nível do mar	Reservatórios
C1	ATUAL	ATUAL	NÃO
C2	ATUAL	ATUAL	SIM
C3 (2070 – 2100)	13,26%	+0,82 m	NÃO
C4 (2070 – 2100)	13,26%	+0,82 m	SIM
C5	ATUAL	ATUAL	SIM (C.F. 1,50)
C6 (2070 – 2100)	13,26%	+0,82 m	SIM (C.F. 1,50)

Fonte: Os autores (2026).

Resultados e discussão

Os resultados obtidos evidenciam que a dinâmica hidrológica da Bacia do Rio Jiquiá é fortemente condicionada pelo elevado grau de urbanização, com predominância de áreas impermeabilizadas em 59,5% da área total (12,62 km²) e valores elevados de *Curve Number* (CN = 82) e rugosidade superficial ($n = 0,16$).

Esse padrão favorece a rápida geração de escoamento superficial e contribui para a amplificação dos picos de cheia, comportamento amplamente documentado em bacias urbanas costeiras. Estudos recentes demonstram que a expansão da infraestrutura urbana e a redução das áreas permeáveis alteram significativamente a forma do hidrograma, aumentando a frequência e a magnitude das inundações, mesmo sob condições climáticas atuais (Lu et al., 2022; Zhou et al., 2024).

As áreas de formação florestal e de mosaico de agricultura e pastagem correspondem a 20,24% e 18,70% da bacia, respectivamente, apresentando maior capacidade de infiltração e valores intermediários de CN e coeficiente de *Manning*. As classes de menor representatividade incluem lavouras temporárias, mangue e corpos d'água, que, embora ocupem pequenas parcelas da área total, foram consideradas na parametrização por influenciarem localmente a dinâmica do escoamento. Esse comportamento é consistente com estudos recentes que demonstram que as mudanças no uso e na cobertura do solo influenciam diretamente os processos hidrológicos, especialmente a infiltração, o escoamento superficial e a resposta hidrológica da bacia, mesmo em classes de menor extensão espacial (Banjara et al., 2024).

A Figura 7 apresenta a comparação entre os níveis d'água simulados e observados para o período de 13 a 15 de maio de 2025, no trecho analisado do rio, incluindo também a série de diferenças entre os valores calculados e medidos.

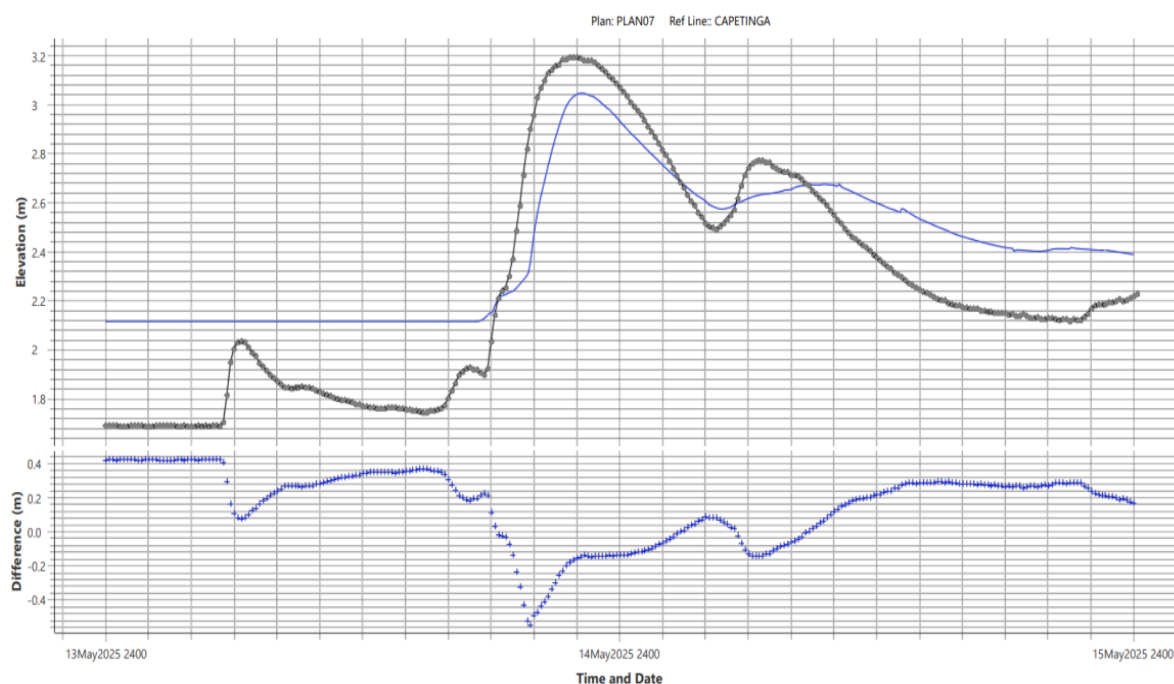


Figura 7. Comparação entre os níveis d'água observados e simulados na estação Capetinga durante o período de calibração (14 a 16 de maio de 2025). A linha preta representa os valores medidos em campo (elevação real do terreno), enquanto a linha azul corresponde aos valores calculados/modelados pelo sistema. O gráfico inferior apresenta a diferença (erro) entre os dados, indicando a discrepância entre o modelo e a medição ao longo do tempo. Fonte: Os Autores (2026).

A comparação entre os níveis d'água simulados e observados evidencia que o modelo foi capaz de reproduzir de forma consistente a dinâmica temporal do evento hidrológico, representando adequadamente o início da elevação, o tempo de ocorrência do pico e a fase de recessão. Observou-se um aumento acentuado do nível entre os dias 13 e 14 de maio, com valores máximos próximos de 3,1–3,2 m nos dados observados.

Tal comportamento é coerente com o regime hidroclimático da cidade do Recife, onde os meses do outono e inverno concentram os eventos de precipitação mais intensos e de maior impacto hidrológico. Estudos recentes indicam elevada probabilidade de chuvas extremas de curta duração nesse período, com valores superiores a 30 mm.h^{-1} apresentando frequência significativa entre março e agosto, o que contribui para respostas hidrológicas rápidas em bacias urbanas (Fonseca et al., 2025).

Além disso, a bacia do rio Jiquiá, integrante do sistema hidrográfico do rio Tejiú, apresenta elevado grau de urbanização e significativa impermeabilização do solo, fatores que aumentam o escoamento superficial e reduzem o tempo de concentração. Como consequência, os hidrogramas tendem a apresentar subida abrupta e elevada sensibilidade a eventos intensos de precipitação. Transformações no uso e na ocupação do solo, associadas ao crescimento urbano desordenado e às mudanças climáticas, têm sido apontadas como elementos determinantes para a intensificação dos episódios de inundação em Recife (Silva Júnior & Silva, 2016; Silva et al., 2020; Lima et al., 2025).

No que se refere ao desempenho do modelo, observou-se uma leve subestimativa da magnitude do pico, além de uma suavização da curva durante a fase de recessão. Esse resultado pode ser explicado, em parte, pelas incertezas

associadas à representação das condições de contorno e, adicionalmente, pela elevada complexidade hidráulica dos sistemas urbanos localizados na planície costeira do Recife.

De fato, em áreas sujeitas à influência de marés e a redes de drenagem urbana complexas, pequenas variações nas condições de contorno hidráulicas podem gerar diferenças significativas nos níveis de inundação e na resposta hidrodinâmica local. Esse efeito torna-se ainda mais evidente quando modelos simplificados não conseguem representar adequadamente os processos costeiros e as interações em múltiplas escalas (Bendoni et al., 2026).

A Figura 8 apresenta a variação temporal do nível d'água (*Stage*) observado e simulado na seção FabYolanda, definida como seção de controle para calibração e validação do modelo hidrodinâmico, localizada em trecho urbanizado da bacia do rio Jiquiá, no âmbito do plano PLAN07, durante o período de 13/05/2025 a 15/05/2025. O painel superior mostra a comparação direta entre as cotas observadas (linha preta) e computadas (linha azul), enquanto o painel inferior apresenta a diferença entre os valores calculados e observados ($Computed - ObservedStage$).

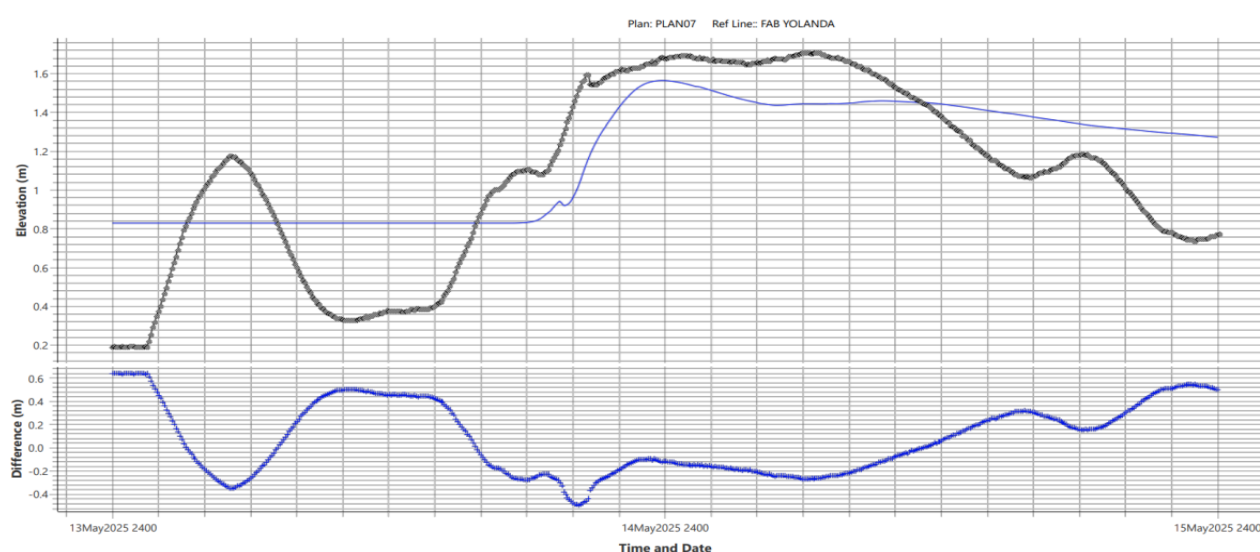


Figura 8. Comparação entre o nível d'água observado e o nível simulado (Validação) no plano PLAN07 (seção Fab Yolanda), com análise das diferenças ao longo do período de 13 a 15 de maio de 2025. A linha preta representa os valores medidos em campo (elevação real do terreno), enquanto a linha azul indica os valores calculados/modelados. O gráfico inferior apresenta a diferença (erro) entre os dados, evidenciando as variações entre o modelo e as medições ao longo do tempo. Fonte: Os Autores (2026).

Observa-se que o modelo reproduz de forma satisfatória a tendência geral de elevação e recessão do nível d'água ao longo do período analisado, capturando adequadamente o aumento expressivo ocorrido no dia 14/5, quando os níveis atingiram valores próximos de 1,6 m.

Resultados semelhantes foram reportados por Kilicarlsan e Temimi (2024), ao avaliarem a validação de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, evidenciando boa representação da forma geral do hidrograma, porém com

limitações na reprodução dos picos máximos. Nesse contexto, é recorrente a tendência de subestimação das vazões ou dos níveis máximos, bem como de pequenas discrepâncias no tempo de ocorrência dos picos, frequentemente associadas a incertezas nos dados de entrada e à parametrização dos modelos.

De forma convergente, Elagca e Dis (2022), ao analisarem processos de calibração hidrológica, demonstraram que, mesmo em situações de bom desempenho global, persistem

limitações na representação dos processos de escoamento rápido, resultando em subestimação das vazões de pico. Ademais, estudos em modelagem hidrodinâmica indicam que defasagens temporais podem decorrer de simplificações na representação da geometria, do armazenamento e das condições de contorno, bem como de aspectos numéricos relacionados à propagação da onda de cheia.

Nesse sentido, a leve defasagem temporal e a subestimação dos picos observadas neste estudo estão em consonância com o comportamento esperado para esse tipo de modelagem. Tais diferenças não comprometem a capacidade do modelo de representar a dinâmica geral do evento, mas indicam a necessidade de ajustes finos de calibração, especialmente para a melhoria da representação dos valores extremos.

No gráfico de diferenças, verifica-se que os maiores desvios ocorrem durante a fase de subida do hidrograma, especialmente no início do dia 14/5, quando a diferença atinge valores negativos mais acentuados (indicando subestimação do modelo). Ao longo da fase de recessão, as discrepâncias diminuem progressivamente, mantendo-se dentro de uma faixa relativamente

estreita, sugerindo melhor desempenho do modelo em condições de escoamento mais estáveis.

Diferenças entre valores observados e simulados, especialmente nos picos de cheia e durante a fase de ascensão do hidrograma, são frequentemente relatadas na literatura e estão associadas às incertezas nos dados de entrada, nas condições de contorno e na parametrização hidráulica (Apel et al., 2024; Nguyen et al., 2026). Estudos recentes também indicam que modelos hidrodinâmicos tendem a reproduzir adequadamente a tendência geral dos níveis d'água, embora apresentem maior sensibilidade durante eventos transientes e em ambientes urbanos complexos (Alves et al., 2022).

A Figura 9 apresenta a comparação entre os níveis d'água observados (linha preta) e simulados (linha azul) na estação Capetinga, no contexto da validação do modelo hidrodinâmico, para o cenário de simulação denominado Plano PLAN13, referente ao período de 2 a 9 de fevereiro de 2025. O painel superior mostra a evolução temporal das cotas, enquanto o painel inferior apresenta a diferença entre os valores computados e observados (*Computed – ObservedStage*).

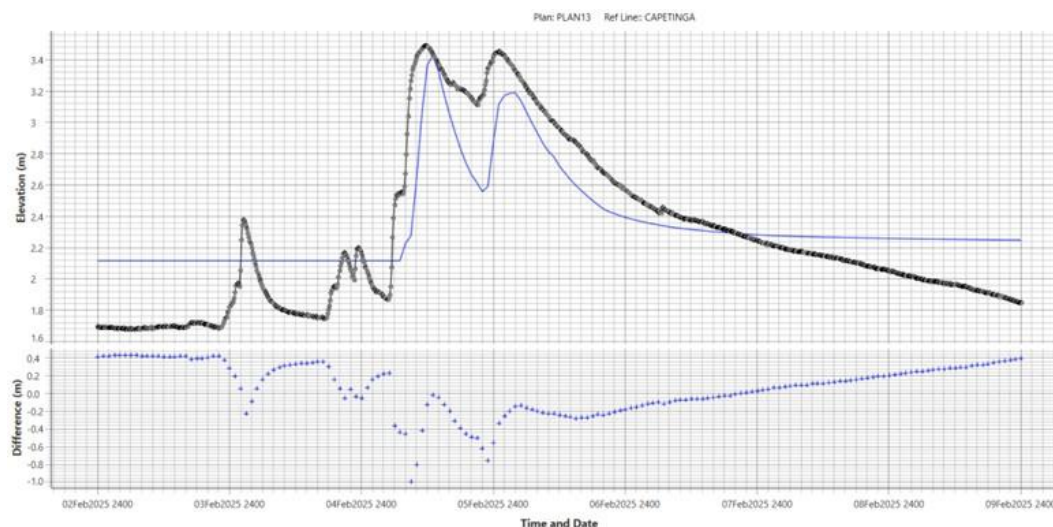


Figura 9. Comparação entre o nível d'água observado e o nível simulado na validação do modelo hidrodinâmico na estação Capetinga (Plano PLAN13). A linha preta representa os valores medidos em campo (elevação real), enquanto a linha azul corresponde aos valores calculados/modelados. O gráfico inferior apresenta a diferença (erro) entre os dados, destacando as discrepâncias entre o modelo e as medições ao longo do tempo. Fonte: Os Autores (2026).

O modelo reproduz satisfatoriamente a dinâmica geral do evento hidrológico, incluindo a elevação abrupta observada entre os dias 3 e 4 de fevereiro, quando os níveis d'água ultrapassam 3,4 m. Contudo, verifica-se a subestimação sistemática

dos picos máximos, mais evidente no primeiro evento de cheia, com diferenças negativas que atingem aproximadamente 1,0 m, conforme indicado no gráfico inferior.

Na fase de recessão, observa-se melhora na aderência entre valores simulados e observados, embora persista leve subestimação ao longo da descida da curva. A partir de 6 de fevereiro, há redução progressiva das discrepâncias, com tendência de convergência entre as séries, ainda que se mantenha um viés negativo moderado.

Esse comportamento está em consonância com a literatura recente, que aponta que modelos hidrológicos e hidrodinâmicos tendem a representar adequadamente a dinâmica global dos eventos, mas apresentam limitações na simulação de picos de cheia. A subestimação desses extremos é frequentemente atribuída às incertezas nos dados de entrada e à simplificação dos processos físicos, resultando na atenuação das ondas de cheia durante a propagação hidráulica (Zhu et al., 2024).

Adicionalmente, mesmo modelos com bom desempenho global podem apresentar baixa acurácia na reprodução de extremos hidrológicos, sobretudo quando calibrados com base em métricas agregadas. Nesse sentido, Muñoz-Castro et al. (2026) destacam que indicadores amplamente utilizados, como NSE e KGE, não asseguram a adequada representação de eventos extremos quando a avaliação não é conduzida em escala de

evento. De forma complementar, Dahal e Kojima (2025) evidenciam que limitações na calibração, na representação espacial dos processos hidrológicos e na qualidade dos dados observados contribuem significativamente para discrepâncias nos picos simulados.

Diante desse cenário, abordagens recentes têm enfatizado o uso de assimilação de dados e modelos híbridos, que integram bases físico-conceituais a técnicas de aprendizado de máquina, como estratégias promissoras para aprimorar a simulação de eventos extremos e reduzir vieses sistemáticos (Jeong et al., 2024).

A Figura 10 apresenta a comparação entre os níveis d'água observados (linha preta) e simulados (linha azul) na estação Fábrica Yolanda, durante o período de 2a 9 de fevereiro de 2025, no processo de validação do modelo hidrodinâmico (Plano PLAN13). O painel superior ilustra a evolução temporal das cotas, enquanto o painel inferior apresenta a diferença entre os valores computados e observados (*Computed – ObservedStage*).

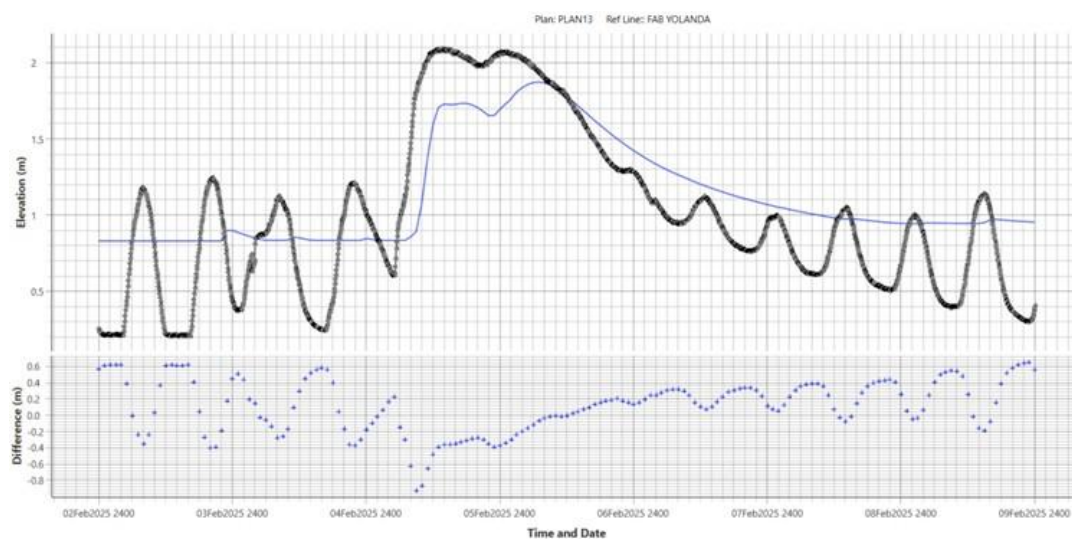


Figura 10. Comparação entre o nível d'água observado e o nível simulado na validação do modelo hidrodinâmico na estação Fábrica Yolanda (Plano PLAN13). A linha preta representa os valores medidos em campo (elevação real), enquanto a linha azul corresponde aos valores calculados/modelados. O gráfico inferior apresenta a diferença (erro) entre os dados, destacando as discrepâncias entre o modelo e as medições ao longo do tempo. Fonte: Os Autores (2026).

Observa-se que o modelo representa adequadamente a tendência geral do evento hidrológico, especialmente a elevação acentuada registrada entre os dias 4 e 5 de fevereiro, quando os

níveis atingem valores superiores a 2,0 m. No entanto, verifica-se a subestimação do pico máximo, evidenciada pela diferença negativa mais

expressiva no gráfico inferior, com valores próximos de -0,8 m durante a fase ascendente.

Outro aspecto relevante é a presença de oscilações periódicas nos níveis observados, possivelmente associadas à influência da maré ou à propagação de ondas de cheia, as quais não são totalmente reproduzidas pelo modelo. Após o pico principal, durante a fase de recessão, o modelo tende a apresentar comportamento mais suavizado em relação à série observada, mantendo diferenças moderadas e relativamente estáveis ao longo do período final analisado.

O desempenho da modelagem também foi avaliado por meio do coeficiente de determinação (R^2), obtendo-se valores de 0,81 para a estação da Capetinga e 0,69 para a estação da Fábrica Yolanda, estando dentro da faixa reportada para aplicações em sistemas urbanos complexos. De acordo com o mesmo critério de classificação adotado na etapa de calibração, o desempenho do modelo pode ser considerado, respectivamente, ótimo e bom para as estações analisadas.

De modo geral, esses resultados indicam que o modelo foi capaz de reproduzir adequadamente a variabilidade temporal dos níveis d'água observados. Além disso, valores de R^2 superiores a 0,6 são frequentemente considerados satisfatórios em estudos de modelagem hidrológica e hidrodinâmica, especialmente em bacias urbanas, nas quais incertezas associadas à variabilidade espacial da precipitação, às condições de contorno e às características hidráulicas são mais pronunciadas (Moriassi et al., 2007). Nesse contexto, os indicadores estatísticos obtidos demonstram que o modelo apresenta desempenho consistente com a literatura e está apto a realizar simulações representativas das condições reais da bacia.

Após a validação do modelo, procedeu-se à análise das soluções adaptativas para a bacia do Rio Jiquiá frente às mudanças climáticas. Foram

simulados quatro cenários, sendo dois representativos das condições atuais (C1 e C2) e dois referentes a projeções futuras (C3 e C4). No cenário C2, foram incorporadas medidas estruturais de adaptação voltadas à mitigação de inundações, com a implantação de reservatórios de retenção na alça da BR-232. Por sua vez, os cenários futuros consideraram um aumento de 13,26% na precipitação e uma elevação de 0,82 m no nível médio do mar, resultando no cenário C3 (condições projetadas para 2100, sem medidas adaptativas) e no cenário C4 (2100, com medidas adaptativas), no qual foram mantidas as mesmas intervenções previstas no C2.

Esse tipo de abordagem é amplamente recomendado na literatura, uma vez que a combinação entre aumento da intensidade das chuvas e elevação do nível do mar tende a agravar os riscos de inundação em bacias urbanas costeiras, como as da Região Metropolitana do Recife (IPCC, 2021). Adicionalmente, estudos indicam que a implantação de reservatórios de retenção e outras infraestruturas de retenção constitui uma das estratégias mais eficazes para a redução de picos de cheia e volumes escoados em áreas urbanas, contribuindo para o aumento da resiliência frente aos cenários de mudanças climáticas (Ahiablame et al., 2012; Fletcher et al., 2015).

A Figura 11 (A e B) apresenta a espacialização da suscetibilidade ambiental da Bacia do Rio Jiquiá, evidenciando a heterogeneidade do território quanto à vulnerabilidade a processos erosivos e à dinâmica do escoamento superficial, especialmente nas áreas urbanizadas e nos trechos adjacentes à infraestrutura viária. Observa-se que as classes mais elevadas de perda de solo concentram-se em áreas com menor cobertura vegetal e maior grau de impermeabilização, coincidindo com setores no qual o sistema de drenagem apresenta maior propensão à sobrecarga.

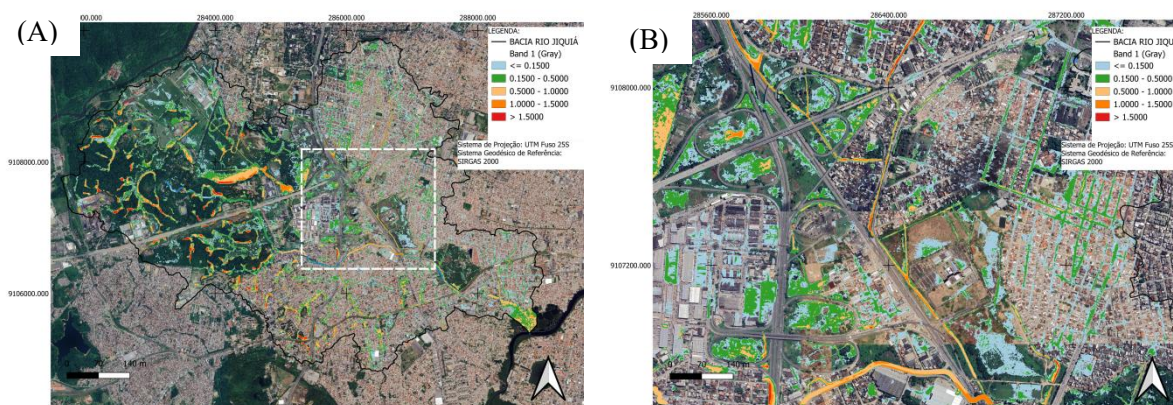


Figura 11. Mapa de suscetibilidade à erosão (RUSLE) na Bacia do Rio Jiquiá, com destaque para a área urbana e classes de perda de solo ($t.ha^{-1}.ano^{-1}$), no cenário C1: mapa de suscetibilidade à erosão (RUSLE) na Bacia do Rio Jiquiá, com detalhamento da área urbana (A) e classes de perda de solo ($t.ha^{-1}.ano^{-1}$), Sistema UTM Fuso 25S, Datum SIRGAS 2000 para a Mancha de inundação(B).

Fonte: Os autores (2026), a partir de processamento em SIG com base em imagem de satélite e aplicação do modelo RUSLE; Sistema de Projeção UTM, Fuso 25S, Datum SIRGAS 2000.

Os resultados obtidos para o Cenário 1 evidenciam a elevada suscetibilidade da bacia do rio Jiquiá a eventos de inundação, especialmente em áreas urbanizadas e hidraulicamente críticas, como trechos a jusante de infraestruturas viárias e confluências de canais. Esse padrão é amplamente reportado na literatura, que aponta que a combinação entre elevada impermeabilização do solo e limitações da rede de drenagem resulta no aumento do escoamento superficial e na intensificação de picos de cheia em bacias urbanas (Fletcher et al., 2015). Ainda que esses estudos não sejam recentes, suas conclusões permanecem válidas e vêm sendo reforçadas por pesquisas mais atuais, que destacam a crescente exposição de áreas urbanas a inundações pluviais, especialmente em regiões costeiras e tropicais (IPCC, 2021).

A formação de lâmina d'água significativa em vias estruturais, como observado na Av. Abdias de Carvalho, está associada à incapacidade do sistema de macrodrenagem de acomodar volumes elevados em curtos intervalos de tempo, condição típica de bacias altamente urbanizadas. Estudos recentes indicam que a conectividade hidráulica reduzida, associada à ocupação irregular e à obstrução de canais, potencializa o risco de extravasamento e de alagamentos em áreas densamente ocupadas (Rodrigues, 2025). Além disso, a concentração dos impactos em áreas com maior vulnerabilidade física e ocupação consolidada reforça o conceito de risco como função integrada entre perigo, exposição e

vulnerabilidade, amplamente discutido em relatórios recentes do IPCC (2021).

No que se refere à análise de suscetibilidade à erosão, a predominância de classes de baixa a moderada perda de solo em áreas urbanas, contrastando com valores mais elevados em encostas e áreas com menor cobertura vegetal, está em conformidade com a aplicação do modelo RUSLE em ambientes urbanos e periurbanos. Estudos recentes demonstram que, mesmo em bacias urbanizadas, áreas remanescentes com solo exposto ou vegetação degradada desempenham papel relevante na geração de sedimentos e no assoreamento de canais, contribuindo indiretamente para a redução da capacidade hidráulica e para o agravamento de inundações (Borrelli et al., 2017).

A avaliação do Cenário 2 evidencia que a implantação de reservatórios de retenção promoveu redução da área inundada, ainda que de forma limitada em termos percentuais. Esse resultado é consistente com a literatura recente, que aponta que medidas estruturais isoladas tendem a apresentar efetividade restrita em bacias altamente impermeabilizadas, especialmente quando não integradas a soluções distribuídas ao longo da bacia (Moon et al., 2024; Park et al., 2025).

A redução de apenas 0,46% da área inundada sugere que, embora os reservatórios contribuam para o amortecimento de picos de cheia, como indicado pelas profundidades máximas simuladas, seu impacto espacial é

condicionado pela escala da intervenção frente ao grau de urbanização da bacia.

Nesse contexto, abordagens contemporâneas de gestão de drenagem urbana têm enfatizado a adoção de soluções baseadas na natureza e de sistemas de drenagem urbana sustentável (SUDS), que atuam de forma distribuída na bacia, promovendo infiltração, retenção e retardamento do escoamento superficial (Fletcher et al., 2015).

Tais estratégias tendem a apresentar maior eficácia quando combinadas a intervenções estruturais convencionais, sobretudo em cenários de mudanças climáticas, nos quais se projeta

aumento da intensidade e da frequência de eventos extremos de precipitação (IPCC, 2021).

Por fim, a integração entre modelagem hidrodinâmica e análise espacial de suscetibilidade mostrou-se fundamental para a identificação de áreas prioritárias para intervenção, evidenciando que a eficácia das medidas propostas está diretamente relacionada ao seu posicionamento estratégico na bacia. Esse tipo de abordagem integrada tem sido amplamente recomendado na literatura recente como suporte à tomada de decisão em planejamento urbano e gestão de riscos hidrológicos (Borrelli et al., 2017).

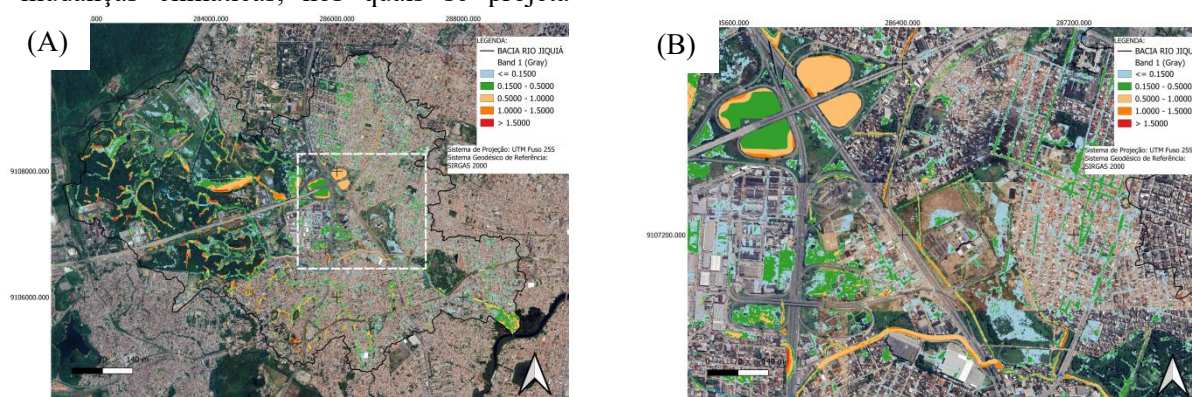


Figura 12. Mapa de suscetibilidade à erosão (RUSLE) na Bacia do Rio Jiquiá ($t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$), cenário C2: Com delimitação da área de intervenção nas alças da BR-232 (A); e Detalhamento do entorno a área urbana.

Fonte: Os autores (2026), a partir de processamento em Sistema de Informação Geográfica (SIG), aplicação do modelo RUSLE e base cartográfica georreferenciada no Sistema UTM, Fuso 25S, Datum SIRGAS 2000.

A Figura 13 (A e B) apresenta a simulação do cenário C3, considerando condições mais pessimistas de precipitação e elevação do nível do mar, sem a implantação de medidas estruturais de controle, como os reservatórios de retenção nas alças da BR-232. Inicialmente, a Figura 13A mostra a espacialização da mancha de inundação em toda a Bacia do Rio Jiquiá, evidenciando a ampliação das áreas alagadas e o aumento das

classes de profundidade em comparação aos cenários atuais. Na sequência, a Figura 13B detalha o setor mais crítico da bacia, abrangendo as imediações das alças da BR-232, o canal São Leopoldo e o trecho do Rio Jiquiá a jusante da confluência, permitindo visualizar com maior precisão a intensificação das lâminas d'água nesse compartimento urbano.

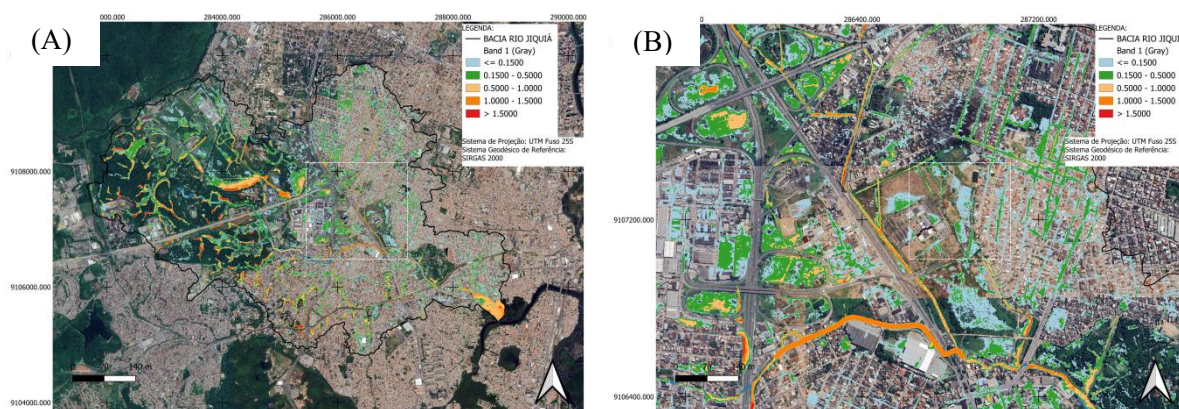


Figura 13. Distribuição espacial das profundidades de inundação na bacia do Rio Jiquiá (Recife–PE), no cenário C3: visão geral da área de estudo (A); detalhamento de trecho urbano com maior suscetibilidade a alagamentos (B).

Fonte: Os autores (2026), a partir de processamento em Sistema de Informação Geográfica (SIG), aplicação do modelo RUSLE e base cartográfica georreferenciada no Sistema UTM, Fuso 25S, Datum SIRGAS 2000.

Os resultados do cenário C3 evidenciam a elevada sensibilidade da bacia do rio Jiquiá a condições hidrometeorologias mais severas, com expansão significativa da mancha de inundação e aumento expressivo das profundidades, especialmente ao longo dos principais eixos de drenagem. A predominância de lâminas superiores a 1,50 m indica não apenas a sobrecarga do sistema hidráulico, mas também o aumento substancial do potencial de danos, uma vez que a profundidade da inundação é um dos principais fatores associados ao risco à infraestrutura urbana e à população exposta. Esse comportamento é consistente com evidências recentes que apontam que eventos extremos, quando combinados a sistemas de drenagem urbanos já próximos da capacidade limite, resultam em respostas não lineares, com amplificação dos impactos hidrológicos (Blöschl et al., 2020).

O aumento de 11,63% na área inundada em relação ao cenário atual reforça a tendência de agravamento dos eventos de cheia em função de mudanças nos regimes de precipitação e da influência das condições de maré. Estudos recentes indicam que a intensificação de eventos extremos de precipitação, associada à elevação do nível do mar, tende a ampliar tanto a extensão quanto a severidade das inundações em bacias costeiras e estuarinas, sobretudo em regiões tropicais (IPCC, 2021).

Além disso, pesquisas como a de Wing et al. (2022) demonstram que pequenas variações nos forçantes hidrológicos podem resultar em aumentos desproporcionais na área inundada, especialmente em ambientes urbanos com elevada impermeabilização.

A elevação dos níveis d'água nos trechos do canal São Leopoldo e do rio Jiquiá a jusante evidencia a limitação da capacidade hidráulica do sistema frente a cenários mais críticos, o que está diretamente relacionado à combinação entre aumento do escoamento superficial, restrições geométricas dos canais e efeitos de remanso. Esse tipo de resposta é frequentemente observado em sistemas urbanos sujeitos à interação entre drenagem pluvial e corpos receptores influenciados por maré, nos quais a redução do gradiente hidráulico compromete o escoamento eficiente (Rodrigues, 2025).

Diante desse contexto, os resultados obtidos reforçam que, na ausência de medidas compensatórias, os impactos das mudanças climáticas tendem a se intensificar de forma significativa. A literatura recente destaca que estratégias de adaptação devem combinar intervenções estruturais, como reservatórios de retenção e ampliação da capacidade hidráulica, com soluções não estruturais, incluindo planejamento do uso do solo, sistemas de alerta e soluções baseadas na natureza, visando aumentar a resiliência urbana (IPCC, 2021). Assim, os resultados deste estudo validam a necessidade de

abordagens integradas de gestão, especialmente em bacias altamente urbanizadas e vulneráveis a eventos extremos.

A Figura 14 (A e B) apresenta o cenário C4, elaborado a partir da simulação das condições mais pessimistas de precipitação e maré projetadas para o ano de 2100, incorporando a implantação de reservatórios na alça da BR-232 como medida de mitigação hidráulica.

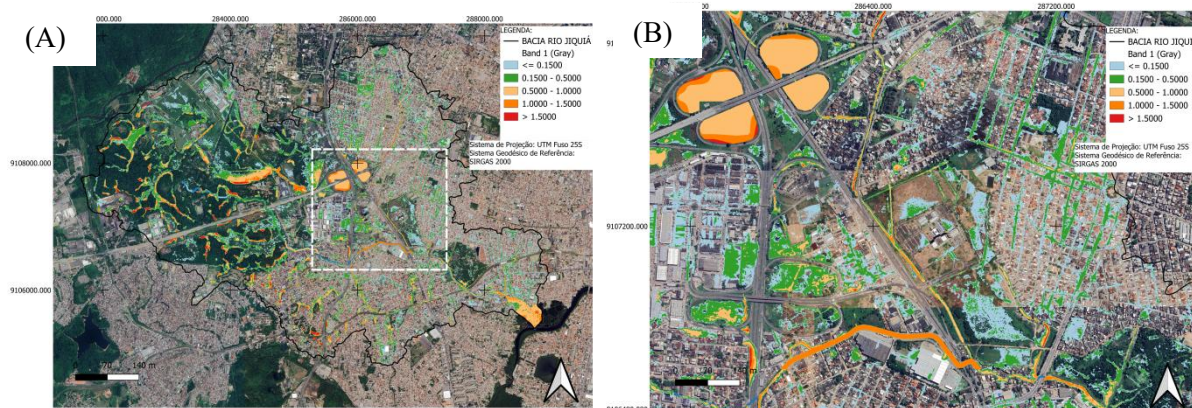


Figura 14. Visão geral da distribuição espacial das áreas de alagamento e faixas de profundidade na bacia de estudo no cenário C4; e Detalhamento da região da alça viária, com destaque para a localização dos reservatórios projetados (A) e as manchas de inundação associadas (B)

Fonte: Os autores (2026), a partir de processamento em Sistema de Informação Geográfica (SIG), aplicação do modelo RUSLE e base cartográfica georreferenciada no Sistema UTM, Fuso 25S, Datum SIRGAS 2000.

A distribuição espacial das áreas suscetíveis ao alagamento no cenário C4 evidencia a forte influência da urbanização na dinâmica hidrológica da bacia, com concentração das manchas de inundação nos setores oeste e sudoeste, onde predominam superfícies impermeáveis e elevada densidade construtiva. A variação das profundidades, com predomínio de lâminas mais elevadas ao longo dos eixos de drenagem, reflete a convergência do escoamento superficial para zonas topograficamente deprimidas e hidraulicamente condicionadas (Figura 14A). Esse padrão é amplamente descrito na literatura, que associa a expansão de áreas impermeáveis ao aumento do volume escoado e à intensificação da conectividade hidrológica, resultando em maior frequência e severidade de alagamentos urbanos (Fletcher et al., 2015).

A persistência de faixas lineares de inundação ao longo de cursos d'água canalizados e corredores viários, mesmo após a implantação dos reservatórios de retenção, evidencia limitações estruturais do sistema de drenagem, especialmente em relação à capacidade de condução e ao efeito de remanso (Figura 14B). Em sistemas urbanos complexos, a canalização de cursos d'água,

associada à ocupação intensiva do entorno, tende a restringir a dissipação lateral do fluxo, favorecendo a concentração e a propagação de ondas de cheia ao longo de eixos preferenciais. Além disso, a presença de infraestrutura viária pode atuar como elemento condicionante do escoamento, funcionando como barreira ou condutor, o que contribui para a formação de corredores de inundação.

A redução marginal da área inundada no cenário C4 (0,05% em relação ao C3) indica que, embora os reservatórios tenham atuado no amortecimento local dos picos, evidenciado pelas profundidades máximas da ordem de 1,5 m, sua influência espacial é limitada frente à magnitude dos forçantes hidrometeorológicos considerados. Esse comportamento é consistente com estudos recentes que demonstram que medidas estruturais pontuais tendem a apresentar ganhos locais, mas não são suficientes para promover reduções expressivas em escala de bacia sob condições extremas, especialmente em ambientes altamente impermeabilizados (Zhou et al., 2024).

O aumento expressivo da área inundada em relação ao cenário C2 (10,79%) reforça, por sua vez, a forte sensibilidade do sistema às condições

climáticas mais severas, indicando que o desempenho das intervenções é condicionado pela intensidade dos eventos simulados.

De acordo com o IPCC (2021), a intensificação de eventos extremos de precipitação tende a superar a capacidade da infraestrutura existente, exigindo abordagens adaptativas mais abrangentes. Nesse contexto, a literatura recente tem destacado a necessidade de integração entre soluções estruturais e estratégias distribuídas, como soluções baseadas na natureza e sistemas de drenagem urbana sustentável, capazes de atuar na redução do escoamento na fonte e no aumento da infiltração (Fletcher et al., 2015; Zhou et al., 2024).

Assim, os resultados do cenário C4 evidenciam que, embora intervenções como

reservatórios de retenção sejam importantes para o controle local de cheias, sua efetividade em escala de bacia é limitada quando não articuladas a um conjunto mais amplo de medidas. Esse achado reforça a importância de abordagens integradas e multiescalares no planejamento da drenagem urbana, especialmente em contextos de mudanças climáticas, nos quais se espera o agravamento das condições hidrológicas extremas e o aumento da exposição ao risco.

A Figura 15 (A e B) apresentam o comportamento hidrodinâmico da bacia no cenário 5 (C5), no qual foram incorporadas medidas adaptativas de controle de inundações para as condições atuais de precipitação e maré, mediante a implantação de reservatórios nas alças da BR-232, adotando cota de fundo de 1,50 m.

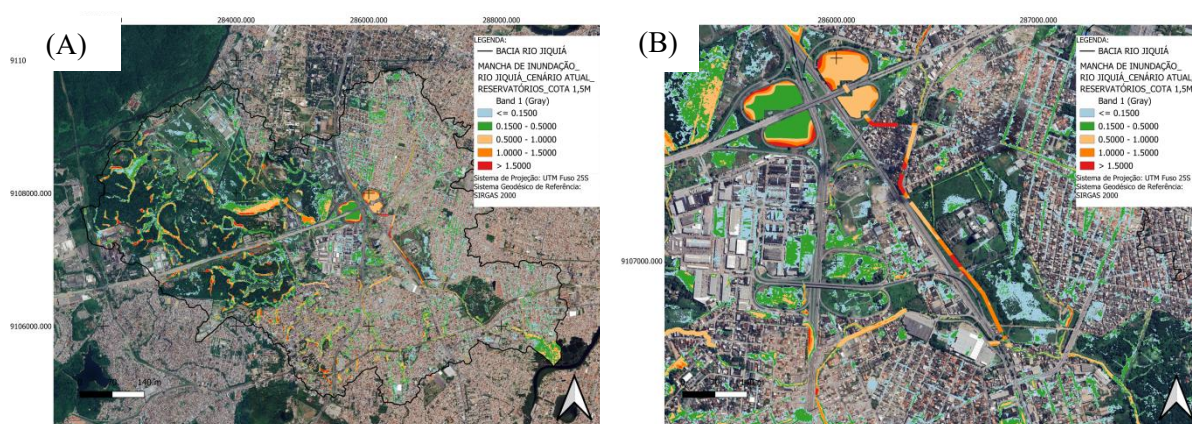


Figura 15. Cenário C5 com implantação de reservatórios nas alças da BR-232 para condições atuais de precipitação e maré: Distribuição espacial das manchas de inundação na bacia hidrográfica (A) e Detalhamento da região das alças viárias e localização dos reservatórios projetados (B).

Fonte: Os autores (2026), a partir de processamento em Sistema de Informação Geográfica (SIG), aplicação do modelo RUSLE e base cartográfica georreferenciada no Sistema UTM, Fuso 25S, Datum SIRGAS 2000.

Os resultados do cenário C5 evidenciam uma mudança significativa no comportamento hidrodinâmico da bacia em resposta à implantação dos reservatórios, com redução expressiva da extensão e da severidade das áreas inundadas. Conforme observado na Figura 15A, há predominância de lâminas d'água rasas e retração das zonas críticas, indicando melhora na capacidade de resposta do sistema de drenagem frente ao evento simulado. Esse padrão reflete a atuação dos reservatórios como dispositivos de amortecimento de picos, promovendo o armazenamento temporário do escoamento superficial e reduzindo a propagação das ondas de cheia a jusante.

A análise em escala local, apresentada na Figura 15B, reforça esse comportamento ao evidenciar a influência direta das estruturas na diminuição das manchas de inundação imediatamente a jusante. A redução da área total alagada para 354,73 ha, correspondente a uma diminuição de 22,08% em relação ao cenário de referência, demonstra que intervenções com maior capacidade de retenção podem produzir efeitos expressivos em escala de bacia. Esse resultado está em consonância com estudos que destacam a eficácia de dispositivos de retenção no controle de cheias urbanas, sobretudo quando dimensionados para volumes compatíveis com eventos críticos (Fletcher et al., 2015).

Além da redução espacial, a diminuição de até 0,5 m nos níveis máximos de inundação em pontos críticos, como os localizados a jusante da Avenida Dr. José Rufino, evidencia ganhos hidráulicos relevantes também em termos de intensidade do evento. A redução simultânea da profundidade e da extensão das inundações implica diminuição do risco associado, uma vez que ambos os parâmetros estão diretamente relacionados ao potencial de danos.

Esse tipo de resposta reforça a importância de intervenções estruturais robustas no contexto de adaptação às mudanças climáticas, especialmente em bacias urbanas altamente impermeabilizadas, onde pequenas variações no armazenamento podem resultar em reduções significativas dos impactos (Araújo et al., 2024).

De forma integrada, os resultados do cenário C5 indicam que, diferentemente de

intervenções pontuais e de menor escala, soluções com maior capacidade de retenção e posicionamento estratégico na bacia apresentam potencial elevado de mitigação de cheias. Ainda assim, a literatura ressalta que a máxima eficiência dessas medidas é alcançada quando associadas a estratégias complementares, como soluções distribuídas e planejamento do uso do solo, ampliando a resiliência do sistema de drenagem urbana frente a eventos extremos (Fletcher et al., 2015; IPCC, 2021).

A Figura 16 apresenta o comportamento hidrodinâmico da bacia no cenário C6, elaborado a partir da simulação das condições mais pessimistas de precipitação e maré projetadas para o ano de 2100, considerando a implantação de reservatórios nas alças da BR-232 com cota de fundo de 1,50 m.

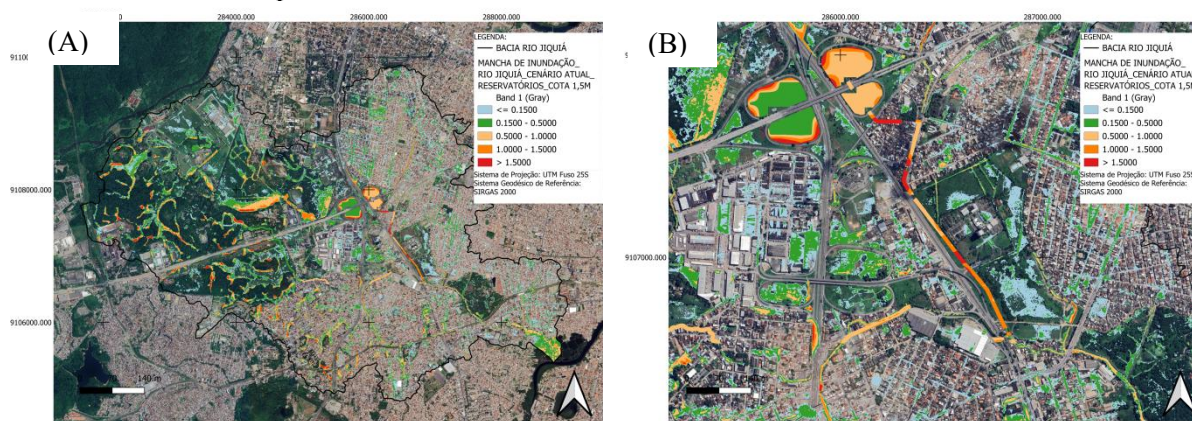


Figura 16. Simulação do cenário C6 com implantação de reservatórios nas alças da BR-232 sob condições extremas de precipitação e maré projetadas para 2100: Distribuição espacial das manchas de inundação na bacia hidrográfica (A); e Detalhamento da área das alças viárias com indicação dos reservatórios e profundidades de lâmina d'água (B).

Fonte: Os autores (2026), a partir de processamento em Sistema de Informação Geográfica (SIG), aplicação do modelo RUSLE e base cartográfica georreferenciada no Sistema UTM, Fuso 25S, Datum SIRGAS 2000.

Os resultados do cenário C6 evidenciam avanços relevantes no desempenho hidráulico da bacia, embora ainda persistam limitações associadas às características estruturais do sistema urbano. Conforme observado na Figura 16A, a distribuição espacial das áreas inundadas mantém um padrão condicionado pela heterogeneidade do uso e ocupação do solo, com permanência de zonas suscetíveis nos setores mais impermeabilizados. A variabilidade das lâminas d'água reflete a influência combinada da topografia local, da conectividade hidráulica e da capacidade limitada de infiltração, fatores amplamente reconhecidos

como determinantes na dinâmica de inundações urbanas (Salvadore et al., 2015).

A análise em escala local, apresentada na Figura 16B, evidencia que os reservatórios implantados exercem influência direta na modulação do escoamento superficial, contribuindo para a redução das áreas inundadas a jusante. As profundidades superiores a 1,5 m observadas no interior dos reservatórios indicam operação próxima à capacidade máxima, o que confirma sua efetividade no amortecimento dos picos de cheia. A redução da área inundada para 406,30 ha, correspondente a 20,05% em relação ao

cenário C3, demonstra ganho expressivo em termos de controle hidráulico, ainda que não suficiente para eliminar completamente as áreas de alagamento, especialmente em regiões com condicionantes geomorfológicos desfavoráveis.

A persistência dessas manchas residuais está diretamente relacionada ao elevado grau de impermeabilização e à resposta hidrológica rápida da bacia, características típicas de ambientes urbanos costeiros. Esse comportamento é consistente com evidências recentes que indicam que a urbanização intensiva reduz o tempo de concentração e eleva as vazões de pico, intensificando a frequência e a magnitude das cheias (Fletcher et al., 2015; Silva et al., 2023). Ademais, em bacias sujeitas à influência damaré, como é o caso do rio Jiquiá, a eficiência do escoamento é adicionalmente comprometida por efeitos de remanso, que reduzem o gradiente hidráulico e favorecem a permanência de áreas inundadas.

A análise integrada dos cenários C1 a C6 reforça a forte dependência entre o desempenho das medidas de controle e as características estruturais da bacia. Nos cenários atuais (C1 e C2), a ocorrência de transbordamentos e a baixa efetividade das intervenções de menor porte evidenciam a insuficiência de soluções pontuais frente ao grau de urbanização existente. Por outro lado, nos cenários futuros (C3 e C4), a intensificação das precipitações, associada à elevação do nível do mar, resultou na ampliação das áreas inundadas e no aumento das profundidades, indicando maior sobrecarga do sistema hidráulico, tendência amplamente projetada em estudos recentes sobre mudanças climáticas (Itagaki et al., 2021; Araújo et al., 2024).

Esse comportamento corrobora a necessidade de adoção de estratégias integradas de gestão, que vão além de intervenções estruturais isoladas, incorporando monitoramento contínuo, planejamento territorial e mapeamento de áreas de risco, conforme destacado por Rodrigues (2025). Nesse contexto, a articulação entre medidas estruturais e não estruturais, aliada ao fortalecimento de políticas públicas baseadas em evidências técnicas, torna-se fundamental para a mitigação dos impactos associados às mudanças climáticas e à elevação do nível do mar, ampliando a resiliência das áreas urbanas vulneráveis.

Em contraste, os cenários com intervenções estruturais ampliadas (C5 e C6) apresentaram reduções expressivas das áreas alagadas, especialmente a jusante dos reservatórios, evidenciando a importância da capacidade de armazenamento no controle de cheias urbanas. No entanto, a permanência de áreas críticas indica que a eficácia dessas medidas é limitada quando considerada isoladamente. A literatura recente destaca que estratégias mais eficazes envolvem a integração entre medidas estruturais e soluções distribuídas, como sistemas de drenagem urbana sustentável, que atuam na redução do escoamento na fonte e no aumento da infiltração (Zhou et al., 2024).

Conclusão

A modelagem hidrológico-hidrodinâmica da bacia do Rio Jiquiá apresentou desempenho satisfatório na reprodução do comportamento hidráulico do sistema, permitindo a análise integrada de cenários atuais (C1 e C2) e futuros (C3 a C6), considerando alterações nos regimes de precipitação e na elevação do nível do mar. A validação do modelo conferiu confiabilidade às simulações, possibilitando a avaliação consistente das respostas hidrodinâmicas frente às diferentes condições impostas.

Os resultados evidenciaram que, no cenário futuro sem intervenções (C3), houve aumento superior a 10% na área inundada, confirmando a elevada sensibilidade da bacia às mudanças climáticas e à intensificação de eventos extremos. Esse comportamento reforça tendências amplamente discutidas na literatura, especialmente para bacias urbanas costeiras, onde a combinação entre aumento da precipitação e elevação do nível do mar potencializa os impactos hidrológicos.

A análise das medidas estruturais demonstrou que intervenções de baixa capacidade volumétrica (C2 e C4) apresentam eficácia limitada, com reduções pouco expressivas das áreas alagadas. Em contrapartida, os cenários com reservatórios de maior capacidade e cota de fundo ajustada (C5 e C6) promoveram reduções superiores a 20% na área inundada, evidenciando a influência direta do volume útil de armazenamento no

amortecimento de picos de cheia e na melhoria do desempenho hidráulico do sistema.

Apesar dos avanços observados, a persistência de manchas residuais de inundação indica que soluções estruturais isoladas podem não ser suficientes para o controle efetivo de cheias em bacias altamente impermeabilizadas. Fatores como uso e ocupação do solo, topografia, conectividade hidráulica e baixa capacidade de infiltração continuam condicionando a dinâmica das inundações, mesmo diante da implantação de medidas de controle.

Dessa forma, conclui-se que o dimensionamento adequado de reservatórios de retenção, aliado à adoção de estratégias compensatórias distribuídas, como soluções baseadas na natureza e sistemas de drenagem urbana sustentável, constitui a alternativa mais eficaz para a mitigação de inundações e o aumento da resiliência hidrodinâmica da bacia do Rio Jiquiá frente aos cenários futuros.

Agradecimentos

À Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana (EMLURB), vinculada à Secretaria de Infraestrutura e Serviços Urbanos da Prefeitura do Recife, pela disponibilização dos relatórios técnicos referentes ao andamento do Plano Diretor de Drenagem Urbana do Recife, atualmente em fase de elaboração.

Referências

Ahiablame, L. M., Engel, B. A., &Chaubey, I. (2012). Effectiveness of low impact development practices: Literature review and suggestions for future research. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223, 4253–4273. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1189-2>

Alves, M. E. P., Fan, F. M., Paiva, R. C. D., Siqueira, V. A., Fleischmann, A. S., Brêda, J. P., Laipelt, L., & Araújo, A. A. (2022). Assessing the capacity of large-scale hydrologic-hydrodynamic models for mapping flood hazard in southern Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 27. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220009>

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA (APAC). *Dados hidrometeorológicos*

do estado de Pernambuco. Recife: APAC, 2025. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br>. Acesso em: 10 de abril de 2026.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA (APAC). Pernambuco Tridimensional – PE3D. Disponível em: <https://pe3d.pe.gov.br/> Acesso em: 14 abril de 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Hidroweb: Sistema de Informações Hidrológicas*. Brasília: ANA, 2025. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 10 de março de 2026.

Apel, H., Benisch, J., Helm, B., Vorogushyn, S., &Merz, B. (2024). Fast urban inundation simulation with RIM2D for flood risk assessment and forecasting. *Frontiers in Water*, 6. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1310182>.

Araújo, D.C.S., Montenegro, S.M.G.L., Silva, S.F., Farias, V.E.M., Rodrigues, A.B. (2024). Analysis of climate change scenarios using CMIP6 models in Pernambuco, Brazil. *Brazilian Journal of Environmental Sciences*, 59, e1868.<https://doi.org/10.5327/Z2176-94781868>

Banjara, M., Bhusal, A., Ghimire, A. B., &Kalra, A. (2024). Impact of land use and land cover change on hydrological processes in urban watersheds: Analysis and forecasting for flood risk management. *Geosciences*, 14(2), 40. <https://doi.org/10.3390/geosciences14020040>

Bates, P. D., Quinn, N., Sampson, C. C., Smith, A. M., Wing, O. E. J., Sosa, J., Savage, J., et al. (2021). Combined modeling of US fluvial, pluvial, and coastal flood hazard under current and future climates. *Water ResourcesResearch*, 57(2), e2020WR028673. <https://doi.org/10.1029/2020WR028673>

Bendonni, M., Caparrini, F., Cucco, A., Taddei, S., Anton, I., Paranunzio, R., Mocali, R., Perna, M., Sacco, M., Corongiu, M., Ortolani, A., Gharbia, S., & Brandini, C. (2026). Multiscale modeling for coastal cities: Addressing climate change impacts on flood events at urban scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 26, 709–736. <https://doi.org/10.5194/nhess-26-709-2026>

Bevacqua, E., Maraun, D., Voutsoukas, M. I., Voukouvalas, E., Vrac, M., Mentaschi, L., &Widmann, M. (2019). Higher probability of

- compound flooding from precipitation and storm surge in Europe under anthropogenic climate change. *Science Advances*, 5(9), eaat7791.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw5531>
- Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S., Schütt B., Ferro V., Bagarello V., Oost KV, Montanarella L., Panagos P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nat Commun.* 2017 Dec 8;8(1):2013. doi: 10.1038/s41467-017-02142-7. PMID: 29222506; PMCID: PMC5722879.
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.
- Chou, S. C.; Marengo, J. A.; Lyra, A. A.; Sueiro, G.; Pesquero, J. F.; Alves, L. M.; Kay, G.; Betts, R.; Chagas, D. J.; Gomes, J. L.; Bustamante, J. F.; Tavares, P. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. *American Journal of Climate Change*, v. 3, p. 512–525, 2014.
- Costabile, P., Costanzo, C., Ferraro, D., Macchione, F., & Petaccia, G. (2020). Performances of the new HEC-RAS version 5 for 2-D hydrodynamic-based rainfall-runoff simulations at basin scale: Comparison with a state-of-the-art model. *Water*, 12(9), 2326. <https://doi.org/10.3390/w12092326>
- Dahal, D., & Kojima, T. (2025). Evaluating the performance of hydrological models for flood discharge simulation in the Wangchu River Basin, Bhutan. *Hydrology*, 12(3), 51. <https://doi.org/10.3390/hydrology12030051>
- Elagca, A., & Dis, M. O. (2022). Application of ArcGIS, HEC-GeoHMS and HEC-HMS for estimation of rainfall-runoff process: Case study over Ballikaya Basin. *Acta Scientiarum. Technology*, 44, e58360. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v44i1.58360>
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W.F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P.S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525–542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>.
- Fonseca Neto, G. C., Silva Júnior, M. A. B., Cabral, J. J. da S. P., & Silva, A. C. (2022). Áreas Vulneráveis Ao Aumento Do Nível Do Mar Em Cidades Costeiras: Um Estudo Na Cidade Do RECIFE, BRASIL. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 12(1), 20–27. <https://doi.org/10.29150/2237-2202.2022.252409>.
- Fonseca, A. F., Rodrigues, D. T., Gonçalves, W. A., Cabral Júnior, J. B., Souza, D. O., & Santos e Silva, C. M. (2025). Probability of sub-hourly extreme precipitation events in Recife, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 164, 105670. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105670>
- Fowler, H. J., Lenderink, G., Prin, A.F., Westra, S., Allan, R.P., Ban, N., Barbero, R., Berg, P., Blenkinsop, S., Do, H.X., Guerreiro, S., Haerter, J.O., Kendon, E.J., Lewis, E., Schaer C., Sharma, A., Villarini, G., Wasko, C., & Zhang, X. (2021). Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 107–122. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014). *Climatechange 2014: Synthesis report*.
- PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. *Base Científica das Mudanças Climáticas no Brasil: Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do PBMC*. Rio de Janeiro: PBMC, 2014. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.
- Itagaki, O.; Bermudez, D.B.S.; Zemmoto. T.; Ohara, M. (2021). Proposal of a method for assessing combined flood risk reduction effect by hazard control measures and exposure reduction measures based on limited data. *Journal of Flood Risk Management*, v.14, n. 3, p. 1-15. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12714>
- Jeong, M., Kwon, M., Cha, J.-H., & Kim, D.-H. (2024). High flow prediction model integrating physically and deep learning-based approaches with quasi real-time watershed data assimilation. *Journal of Hydrology*, 636, 131304. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131304>

- Kilicarslan, B. M., & Temimi, M. (2024). Simulating block-scale flood inundation and streamflow using the WRF-Hydro model in the New York City metropolitan area. *Natural Hazards*, 120, 10043–10066. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06597-y>
- Lima, L. D. B., Silva, C. E. M., Oliveira, C. M. E., Rodrigues Junior, J.C., & Gomes, D.P. (2025). Mapping of flood-susceptible areas in Recife-PE/Brazil. *EspaçoemRevista*, 27(1), 21–44. <https://doi.org/10.70261/er.v27i1.74841>
- Lu, W.; Xia, W.; Shoemaker, C.A. (2022). Surrogate global optimization for identifying cost-effective green infrastructure for urban flood control with a computationally expensive inundation model. *Water Resources Research*, v.58, n.4, p. 1–23. <https://doi.org/10.1029/2021WR030928>
- MAPBIOMAS. (2023). MapBiomias Brasil. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 20 de março de 2026.
- Marengo, J. A., Cunha, A.P., Cuartas, L.A., Leal, K.R.D., Brodel, E., Seluchi, M.E., Michelin, C.M., Baião, C.F.P., Angulo, E.C., Almeida, E.K., Kazmierczak, M.L., Mateus, N.P.A., Silva, R.C., & Bender, F. (2021). Extreme drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020. *Frontiers in Water*, 3. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.639204>.
- Moftakhari, H. R., Schubert, J. E., Aghakouchak, A., Sanders, B. F., & Matthew, R. A. (2022). Compounding effects of sea level rise and fluvial flooding. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(13), e2118285119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2118285119>.
- Moon, H.-T.; Kim, J.-S.; Chen, J.; Yoon, S.-K.; Moon, Y.-I. **Mitigating urban flood hazards: Hybrid strategy of structural measures and green infrastructure.** *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 108, 2024, 104542. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104542>.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=23153>
- Muñoz-Castro, E., Anderson, B.J., Astagneau, P.C., Swain, D.L., Mendoza, P.A., & Brunner, M.I. (2026). How well do hydrological models simulate streamflow extremes? *Hydrology and Earth System Sciences*, 30, 825–848. <https://doi.org/10.5194/hess-30-825-2026>
- Nguyen, M., Wilson, M.D., Lane, E.M., Brasington, J., & Pearson, R.A. (2026). Quantifying uncertainty in flood predictions due to river bathymetry estimation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 30, 183–203. <https://doi.org/10.5194/hess-30-183-2026>
- Park, H. J., Song, S. M., Kim, D. H., & Lee, S. O. (2025). Study on the effectiveness of multi-dimensional approaches to urban flood risk assessment. *z*, 15(14), 7777. <https://doi.org/10.3390/app15147777>.
- Prefeitura do Recife (2020). *Plano diretor de drenagem urbana do Recife*.
- Rodrigues, A. B. (2025). Modelagem bidimensional de inundações na bacia do rio Frágoso em uma área costeira altamente urbanizada com influência das marés. *Geo UERJ*, Rio de Janeiro, v. 47, 2025. DOI: <https://doi.org/10.12957/geouerj.2025.76153>. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/geouerj/article/view/76153>.
- Salvadore, E.; Bronders, J.; Batelaan, O. *Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. Journal of Hydrology*, v. 529, p. 62–81, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.028>
- Silva Júnior, M. A. B., & Silva, S. R. (2016). Impactos da urbanização no sistema de drenagem do Recife-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(6), 2034–2053 <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.6.p2034-2053>
- Tang, B., & Gallien, T. (2023). Predicting compound coastal flooding in embayment-backed urban catchments: Seawall and storm drain implications. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/jmse11071454>.
- USACE (United States Army Corps of Engineers) (2016). *HEC-RAS river analysis system: User's manual (Version 5.0)*.
- Vasconcelos, Ronald Fernando Albuquerque (org.). *Recife: drenagem urbana – entre os rios e o mar: caminhos e descaminhos das águas na cidade*. Recife: CepeEditora, 2022.

- Wing, O. E. J., Lehman, W., Bates, P.D., Sampson, C.C., Quinn, N., Smith, A.M., Neal, J.C., Porter, J.R., & Kousky, C. (2022). Inequitable patterns of US flood risk in the Anthropocene. *Nature Climate Change*, 12, 156-162. <https://www.nature.com/articles/s41558-021-01265-6#citeas>
- Zhou, Q., Mikkelsen, P. S., Halsnæs, K., & Arnbjerg-Nielsen, K. (2022). Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits. *Journal of Hydrology*, 414-415, 539-549. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.031>
- Zhou, Q., Sun, T., & Smith, J. (2024). How urban form impacts flooding. *Nature Communications*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50347-4>
- Zhu, Q., Qin, X., Zhou, D., Yang, T., & Song, X. (2024). Impacts of spatiotemporal resolutions of precipitation on flood event simulation based on multimodel structures – a case study over the Xiang River basin in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28 (7), 1665–1686. <https://doi.org/10.5194/hess-28-1665-2024>