



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
ENGENHARIA AMBIENTAL

FELIPE DANIEL DE OLVEIRA SANTOS

**Mapeamento de manchas urbanas de inundação a partir de modelagem
hidrodinâmica em um trecho do rio Capibaribe - Recife/PE**

JOÃO PESSOA

2025

FELIPE DANIEL DE OLIVEIRA SANTOS

**Mapeamento de manchas urbanas de inundação a partir de modelagem
hidrodinâmica em um trecho do rio Capibaribe - Recife/PE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia
Ambiental da Universidade Federal da Paraíba
(Campus I) como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof^ª. Dr. Davi de Carvalho Diniz
Melo

JOÃO PESSOA

2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S237m Santos, Felipe Daniel de Oliveira.

Mapeamento de manchas urbanas de inundação a partir de modelagem hidrodinâmica em um trecho do rio Capibaribe - Recife/PE / Felipe Daniel de Oliveira Santos. - João Pessoa, 2025.

99 f.

Orientação: Davi de Carvalho Diniz Melo.
TCC (Graduação) - UFPB/BSCT.

1. SWAT Plus, HEC-RAS, LiDAR, Modelagem hidrológica.
I. Melo, Davi de Carvalho Diniz. II. Título.

UFPB/BSCT

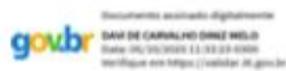
CDU 624(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

FELIPE DANIEL DE OLIVEIRA SANTOS

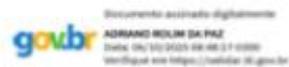
Mapeamento de manchas urbanas de inundação a partir de modelagem hidrodinâmica em um trecho do rio Capibaribe - Recife/PE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 03/10/2025 perante a seguinte Comissão Julgadora:



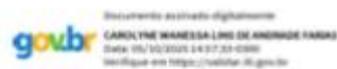
Prof. Dr. Davi de Carvalho Diniz Melo
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Aprovado
(Aprovado/Reprovado)



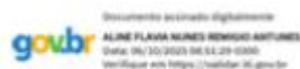
Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Aprovado
(Aprovado/Reprovado)



Prof.Dra. Carolyne Wanessa Lins de Andrade Farias
Departamento de Geociências

Aprovado
(Aprovado/Reprovado)



Prof.a. Aline Flávia Nunes Remigio Antunes
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos não são apenas um simples “obrigado”, mas sim um espaço de profunda gratidão, onde posso expressar todo o reconhecimento àqueles que estiveram comigo em todos os momentos da minha vida — e a conclusão desta etapa certamente é um deles. Minha maior gratidão é à minha mãe, Francisca Zanilda de Oliveira, que sempre me mostrou os melhores

caminhos a seguir, moldando minha vida e fazendo de mim a minha melhor versão. Foi ela que permaneceu ao meu lado em todos os instantes, oferecendo apoio incondicional, me fortalecendo e me abastecendo de coragem até nos momentos em que já não me restava um pingote de motivação. Aos meus irmãos, Fernando Mateus de Oliveira Santos e Marcos André de Oliveira Santos, e ao meu sobrinho Joaquim, deixo minha sincera gratidão, pois foram eles minha base sólida no dia a dia, um dos principais motivos que me impulsionaram a persistir e seguir firme na luta pelos meus objetivos. À minha avó, meus tios e minhas tias, que sempre representaram uma segunda família, me apoiando e me levantando sempre que precisei — em especial Maria Isabel, Josemildo, Zanete Oliveira, Júnior, Maria e Maria Edna. Aos meus amigos que se tornaram verdadeiros irmãos nesta longa jornada, dividindo comigo tanto as alegrias quanto as dificuldades: Antônio Edmilson, Allyson Oliveira, André Azevedo, Igor Oliveira, Raul Brendo, Ana Regina, Murilo Ywsk, Alaine Souza, João Vitor, Matheus Carvalho, Thomás Amorim, Beatriz Aguiar e Leonardo. Obrigado por nunca me deixarem caminhar sozinho. Minha gratidão também se estende a todos os professores da Universidade Federal da Paraíba, com quem tive a honra de aprender. Cada ensinamento transmitido foi essencial, não apenas para minha formação acadêmica, mas também para minha evolução como profissional e como ser humano. Em especial, agradeço à minha primeira orientadora de extensão, Carolyne Wanessa Lins, que me ensinou toda a base de SIG que carrego até hoje e que, além do profissionalismo, sempre demonstrou amizade e apoio nos momentos em que mais precisei. Agradeço ainda ao professor Adriano Rolim, que despertou em mim a paixão pela área de recursos hídricos, especialmente nas aulas de Drenagem Urbana de Águas Pluviais. Suas aulas impecáveis, sua didática e, sobretudo, sua preocupação genuína com os alunos me motivaram a seguir com entusiasmo e dedicação. Assim como, ao meu orientador, professor Davi de Carvalho Diniz Melo, pela dedicação em meio a tantas responsabilidades, pelas discussões técnicas precisas, pelos aprendizados e pelas oportunidades oferecidas. E, por fim, agradeço a Deus, que até aqui me permitiu viver tantas experiências, me deu forças nas batalhas, colocou pessoas especiais no meu caminho e me concedeu a oportunidade de crescer e evoluir a cada dia, não só a mim, mas também a todos que caminham ao meu lado.

RESUMO

Relatórios recentes mostram que desastres naturais, especialmente inundações, geram perdas econômicas expressivas em escala global. No Brasil, o CEPED (Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres) aponta o Nordeste como a região com maior número de ocorrências (37.965) entre 2012 e 2023, com Pernambuco entre os estados mais afetados; em Recife, o rio Capibaribe vem registrando episódios recorrentes de inundação severas. A aplicação do sensoriamento remoto de alta resolução para caracterização espacial e topográfica vem sendo cada vez mais revolucionária no campo da hidrologia e em estudos de eventos

extremos. Nesse contexto, a tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) viabiliza modelos tridimensionais de alta resolução espacial, essenciais para caracterizar relevo e calha fluvial com precisão, enquanto a modelagem numérica permite explorar cenários, apoiar o planejamento e orientar decisões em áreas de risco. Dessa forma, o presente trabalho busca avaliar o mapeamento de manchas de inundações em um trecho urbano do rio Capibaribe – Recife/PE por meio da modelagem hidrodinâmica mediante a obtenção de vazões simuladas utilizando um modelo hidrológico. O trabalho integrou modelagem hidrológica (SWAT Plus) e hidrodinâmica (HEC-RAS) para simulação de vazões e, por conseguinte, manchas de inundações. Na etapa hidrológica, foram utilizadas informações de solo, uso e cobertura da terra e séries de dados meteorológicos para gerar uma série de vazões simuladas. Na etapa hidrodinâmica, as vazões simuladas e coeficientes de *Manning* alimentaram simulações em regime não permanente, resultando em manchas de inundações para os intervalos 2003–2006, 2010–2013 e 2020–2025, sob cenários reais (variando o *Manning* sob imageamento de satélite) e hipotéticos (*Manning* de vegetação densa em todo o trecho). Foram obtidas manchas de inundações dos 2 cenários para 3 intervalos temporais, obtendo diferenças significativas de profundidade e velocidades da mancha de inundações entre cenários. Para o primeiro intervalo, houve uma diferença de 30 centímetros na altura da lâmina de água e 0,12 m/s entre velocidades do cenário real (máximo valor de lâmina d'água e velocidade de 4,0 metros e 0,68 m/s, respectivamente) e hipotético (máximo valor de lâmina e velocidade de 3,7 metros e 0,56 m/s, respectivamente), respectivamente; Para o segundo intervalo, houve uma diferença de 20 centímetros na altura da lâmina de água e 0,18 m/s entre velocidades do cenário real (máximo valor de lâmina d'água e velocidade de 4,2 metros e 0,78 m/s, respectivamente) e hipotético (máximo valor de lâmina d'água e velocidade de 4,0 metros e 0,60 m/s); Para o terceiro intervalo, houve uma diferença de 20 centímetros na altura da lâmina de água e 0,2 m/s entre velocidades do cenário real (máximo valor de lâmina d'água e velocidade de 3,0 metros e 0,60 m/s, respectivamente) e hipotético (máximo valor de lâmina d'água e velocidade de 2,8 metros e 0,40 m/s, respectivamente). As análises retiradas do presente trabalho destacam a aplicação e eficiência de softwares em estudos hidrológicos e hidrodinâmicos em quaisquer regiões do mundo, especialmente em áreas que carecem de dados e apresentem problemas significativos de impactos hidrológicos.

Palavras-chave: SWAT Plus, HEC-RAS, LiDAR, Modelagem hidrológica, Modelagem hidrodinâmica.

ABSTRACT

Recent reports show that natural disasters, especially floods, generate significant economic losses on a global scale. In Brazil, CEPED (University Center for Studies and Research on Disasters) identifies the Northeast as the region with the highest number of occurrences

(37,965) between 2012 and 2023, with Pernambuco among the most affected states; in Recife, the Capibaribe River has recorded recurrent episodes of severe flooding. The application of high-resolution remote sensing for spatial and topographic characterization has become increasingly revolutionary in the field of hydrology and in studies of extreme events. In this context, LiDAR (Light Detection and Ranging) technology enables three-dimensional models with high spatial resolution, essential for accurately characterizing terrain and river channels, while numerical modeling allows the exploration of scenarios, supports planning, and guides decision-making in risk areas. Accordingly, this study seeks to evaluate the mapping of flood extents in an urban stretch of the Capibaribe River – Recife/PE through hydrodynamic modeling, based on simulated discharges generated using a hydrological model. The research integrated hydrological modeling (SWAT Plus) and hydrodynamic modeling (HEC-RAS) for flow simulation and, consequently, flood extent delineation. In the hydrological stage, soil, land use/land cover, and meteorological series were used to generate a series of simulated discharges. In the hydrodynamic stage, the simulated flows and Manning's coefficients were applied in unsteady-flow simulations, resulting in flood extents for the intervals 2003–2006, 2010–2013, and 2020–2025, under both real scenarios (with Manning's values varying according to satellite imagery) and hypothetical scenarios (Manning values representing dense vegetation along the entire reach). Flood extents were obtained for both scenarios across the three time intervals, showing significant differences in water depth and velocity between scenarios. For the first interval, there was a 30-centimeter difference in water depth and 0.12 m/s in velocity between the real scenario (maximum depth and velocity of 4.0 meters and 0.68 m/s, respectively) and the hypothetical scenario (maximum depth and velocity of 3.7 meters and 0.56 m/s, respectively). For the second interval, there was a 20-centimeter difference in water depth and 0.18 m/s in velocity between the real scenario (maximum depth and velocity of 4.2 meters and 0.78 m/s, respectively) and the hypothetical scenario (maximum depth and velocity of 4.0 meters and 0.60 m/s, respectively). For the third interval, there was a 20-centimeter difference in water depth and 0.20 m/s in velocity between the real scenario (maximum depth and velocity of 3.0 meters and 0.60 m/s, respectively) and the hypothetical scenario (maximum depth and velocity of 2.8 meters and 0.40 m/s, respectively). The analyses presented in this study highlight the application and efficiency of software tools in hydrological

and hydrodynamic studies in any region of the world, especially in areas that lack data and face significant hydrological impact challenges.

Keywords: SWAT Plus, HEC-RAS, LiDAR, Hydrological modeling, Hydrodynamic modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coleta de dados do LiDAR em aeronaves	29
Figura 2. Representação das nuvens de pontos no relevo por meio do LiDAR	30
Figura 8. Mapa altimétrico da bacia hidrográfica delimitada.....	43
Figura 9. Mapa de uso e cobertura da bacia hidrográfica delimitada.....	44
Figura 10. Mapa de tipos de solo da bacia hidrográfica delimitada.	45
Figura 11. Fluxograma das etapas do SWAT Plus.	46
Figura 12. Localização dos pontos de exutórios para delimitação das sub bacias no SWAT. ..	48
Figura 13. Mapa de localização do trecho escolhido para modelagem hidrodinâmica.	54
Figura 14. Delimitação da calha e do canal principal do rio na geometria do RasMapper.	55
Figura 15. Delimitação dos Ban Lines, Rivers, Flow Path e Crosssections no RasMapper.	56
Figura 16. Vazões utilizadas na modelagem hidrodinâmica.....	58
Figura 17. Comportamento da comparação da vazão simulada pelo modelo hidrológico com vazão observada, antes da calibração.	61
Figura 18. Comportamento mensal do Hidrograma e hietograma antes da calibração.	63
Figura 19. Hidrograma e hietograma das vazões observadas e validadas e da precipitação média mensal de 2010 a 2025.	63
Figura 20. Hidrograma entre os anos 2003 e 2006.....	65
Figura 21. Comparação da mancha de inundação entre cenários ocasionado pela vazão de pico no intervalo entre 2003 e 2006.	66
Figura 22. Comparação do espalhamento da mancha de inundação para o cenário real (imagem 1) e hipotético (imagem 2).....	67
Figura 23. Comparação da superfície da lâmina de água (m) dos cenários referente a vazão de pico entre 2003 e 2006.....	67
Figura 24. Comparação da velocidade do escoamento (m/s) entre cenários ocasionado pela vazão de pico no intervalo entre 2003 e 2006	68
Figura 25. Comparação da velocidade do escoamento (m/s) da água entre os cenários entre os anos de 2003 e 2006.	69
Figura 26. Comportamento fluviométrico entre os anos 2010 e 2013	71
Figura 27. Comparação da mancha de inundação entre cenários ocasionado pela vazão de pico no intervalo entre 2010 e 2013.	72

Figura 28. Comparação do espalhamento da mancha de inundação para o cenário real (imagem 3) e hipotético (imagem 4).....	72
Figura 29. Comparação da superfície da lâmina de água dos cenários referente a vazão de pico entre 2010 e 2013.	73
Figura 30. Comparação da velocidade de escoamento entre cenários ocasionado pela vazão de pico no intervalo entre 2010 e 2013	74
Figura 31. Comparação do comportamento da velocidade da água dos cenários referente a vazão de pico entre 2010 e 2013.....	75
Figura 32. Comportamento fluviométrico entre os anos 2021 e 2025.	76
Figura 33. Comparação da mancha de inundação entre cenários ocasionado pela vazão de pico no intervalo entre 2020 e 2025.	77
Figura 34. Comparação do espalhamento da mancha de inundação para o cenário real (imagem 6) e hipotético (imagem 5).....	77
Figura 35. Comparação da profundidade da lâmina de água dos cenários referente a vazão de pico entre 2020 e 2025.....	78
Figura 36. Comparação da velocidade de escoamento entre cenários ocasionado pela vazão de pico no intervalo entre 2020 e 2025.	79
Figura 37. Comparação da profundidade da velocidade da água dos cenários referente a vazão de pico entre 2020 e 2025.....	80
Figura 38. Quantificação da ocupação da área da mancha de inundação (cenário hipotético) em cada bairro	83
Figura 39. Quantificação da ocupação da mancha de inundação (cenário real) por bairro.	84
Figura 40. Validação registral da mancha simulada	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados do uso e cobertura do solo e sua codificação	46
Tabela 2. Dados do uso e cobertura do solo e sua codificação baseado no banco de dados do SWAT	49
Tabela 3. Dados dos postos pluviométricos inseridos no SWAT Editor.	50
Tabela 4. Análise da qualidade do modelo	51
Tabela 5. Definição dos parâmetros e limites utilizados na calibração do modelo.	52
Tabela 6. Valores resultantes dos parâmetros calibrados automaticamente pelo SWAT ToolBox.	62
Tabela 7. Análise estatística do modelo para o posto	64

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1.	Impactos da expansão urbana	16
1.2.	Problemas com inundações a nível global.....	16
1.3.	Desafios nacionais de inundação	18
1.4.	Eventos de inundações no Nordeste	20
1.5.	As inundações no estado de Pernambuco.....	21
1.6.	O avanço de tecnologias em confrontação aos desafios eventos hídricos extremos	21
1.7.	Modelos hidrológicos e hidrodinâmicos.....	24
2.	OBJETIVOS	25
2.1.	Objetivo geral	25
2.2.	Objetivos específicos	25
3.	REFERÊNCIAL TEÓRICO	26
3.1.	Caracterização da bacia do rio Capibaribe	27
3.2.	Topografia.....	27
3.3.	Imagens LiDAR.....	28
3.4.	Sistemas de Informações Geográficas	32

3.5.	Modelos hidrológicos	33
3.6.	Modelos de Simulação de manchas de inundação	35
4.	METODOLOGIA.....	36
4.1.	Descrição da área de estudo.....	38
4.2.	Preparação do banco de dados.....	42
4.3.	Etapas do SWAT	46
4.4.	Entrada de dados no HEC-RAS	53
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1.	Modelagem hidrológica.....	60
5.2.	Modelagem hidrodinâmica.....	65
5.3.	Análise de registros de inundações em comparação as simulações de mancha de inundações.....	85
6.	CONCLUSÕES.....	87
7.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

1. INTRODUÇÃO

1.1. Impactos da expansão urbana

A relação entre o meio natural e a variação do uso e cobertura do solo tem sido amplamente documentada, com estudos demonstrando que a conversão de áreas naturais para fins urbanos e agrícolas altera significativamente os processos ambientais, em especial o regime hidrológico, ao reduzir a infiltração e aumentar o escoamento superficial, e a dinâmica ecológica (Seto et al., 2012). Essa transformação tem sido intensificada pelo acelerado crescimento populacional, no qual a população global deve atingir 9,9 bilhões até 2054, com mais de 70% concentrada em áreas urbanas, pressionando exponencialmente a mudança no uso da terra (ONU, 2024; ONU, 2018).

No Brasil, esse crescimento demográfico, quando não acompanhado de planejamento urbano adequado, origina ocupações desordenadas em encostas e planícies de inundação, expondo comunidades a desastres como deslizamentos e enchentes. Segundo o Serviço Geológico Brasileiro - SGB, cerca de 4 milhões de pessoas vivem em áreas suscetíveis a inundações. Dados do MapBiomas de 2023 (Souza et al., 2020) mostram ainda que a urbanização em zonas de risco quase triplicou nos últimos 40 anos, aumentando a exposição a desastres. Ademais, a mesma fonte também indica que a área urbanizada em zonas de risco muito suscetíveis a inundações, vem alcançando 425 mil hectares, evidenciando a acelerada pressão antrópica sobre territórios hidrologicamente instáveis. Esse processo reflete uma intensificação histórica da ocupação de áreas ambientalmente vulneráveis, que compromete a capacidade adaptativa da população, sobretudo pelo acesso limitado a serviços de emergência e infraestrutura básica (Dantas, 2024).

1.2. Problemas com inundações a nível global

A expansão de ocupações em planícies de inundação e margens de rios ampliam a frequência e gravidade dos eventos de inundação urbana. Essa combinação aumenta a exposição das populações, reduzindo sua capacidade de resposta e recuperação frente a cheias.

Segundo o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN, a maioria dos desastres climáticos estão relacionada a inundações e deslizamentos, concentrando-se em regiões densamente urbanizadas e desiguais. O agravamento da crise climática, conforme o Relatório AR6 do *Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC (IPCC, 2023), está associado à intensificação do ciclo hidrológico e ao aumento da frequência de chuvas intensas, fenômenos que já moldam um novo regime climático no país. Este mesmo relatório mostra que eventos de precipitação extrema vêm se tornando mais frequentes desde a década de 1950. Esse novo padrão climático soma-se fatores locais, como desmatamento, impermeabilização do solo, urbanização em áreas de risco e infraestrutura precária, amplificando cada vez mais os impactos das inundações, tornando este desastre cada vez mais frequente e devastador.

As inundações continuam a causar impactos devastadores em diversos continentes. Na África, o Quênia enfrenta enchentes severas desde março de 2024, deixando 277 mortos e mais de 200 mil deslocados, enquanto eventos anteriores, em novembro de 2023, já haviam causado 260 mortes e afetado 1 milhão de pessoas (ONU, 2024). No continente asiático, desastres hídricos atingiram o Afeganistão, onde enchentes desde abril de 2024 resultaram em 411 mortes, destruindo milhares de casas e plantações, e na Indonésia, as inundações causaram 67 mortes, com dezenas de desaparecidos (WMO, 2024). Na Europa, chuvas extremas provocaram enchentes catastróficas na Alemanha, Bélgica e Holanda, deixando mais de 120 mortos e centenas de desaparecidos, caracterizando-se como as chuvas mais intensas em um século, afetando infraestrutura urbana e regiões agrícolas (OMM, 2024). O avanço da urbanização tem acelerado o fluxo de água para rios e reservatórios, aumentando a concentração de grandes volumes hídricos e potencializando os efeitos das inundações. A intensificação do escoamento nos sistemas convencionais de drenagem agrava esse fenômeno, tornando as áreas urbanas mais vulneráveis a enchentes (Tucci e Bertoni, 2003; Dantas, 2024).

De acordo com relatórios recentes, os desastres naturais, incluindo inundações, causam perdas econômicas substanciais em escala global. Os impactos financeiros desses eventos totalizam US\$ 2,3 trilhões por ano, um crescimento de 10 vezes em relação às estimativas anteriores (ONU, 2018). Em 2024, o relatório *Climate and Catastrophe Insight* revelou que os desastres naturais resultaram em US\$ 368 bilhões em prejuízos econômicos, marcando o nono

ano consecutivo com perdas superiores a US\$ 300 bilhões. Além disso, 77% das perdas econômicas decorrem de eventos climáticos extremos, somando US\$ 2,245 trilhões nos últimos anos, representando um aumento de 151% em comparação com períodos anteriores.

Os desastres causados por inundações afetam de maneira desproporcional as populações vulneráveis e de baixa renda, que frequentemente ocupam áreas de risco sem infraestrutura adequada. O agravamento do ciclo hidrológico e a intensificação de eventos extremos aumentam os danos materiais e socioeconômicos, tornando a recuperação dessas comunidades ainda mais difícil. Segundo Rentschler (2022), globalmente, 1,81 bilhão de pessoas (23% da população mundial) estão em áreas de alto risco de inundação. Destes, 1,61 bilhão (89%) vivem em países de baixa e média renda, onde a vulnerabilidade socioeconômica agrava os impactos das inundações.

1.3. Desafios nacionais de inundação

Nas últimas décadas, houve uma mudança expressiva na frequência e intensidade dos eventos hidrológicos extremos em diversas regiões do mundo. No Brasil, algumas áreas registraram um aumento significativo na incidência de cheias, refletindo alterações nos regimes climáticos e hidrológicos (Archfield et al., 2016; Chagas et al., 2022). Ao longo das últimas quatro décadas, algumas regiões do Brasil registraram um crescimento expressivo nas vazões de cheia, com aumentos de até 32% por década (Chagas et al., 2022). Vê-se que os cenários de inundação no Brasil estão cada vez mais críticos, principalmente no que tange à expansão desordenada das áreas urbanas sobre planícies de inundação e à crescente impermeabilização do solo, fatores que sobrecarregam os sistemas de drenagem e intensificam a gravidade dos alagamentos. Os cenários de inundações no Brasil estão entre os mais devastadores do mundo, refletindo um histórico de eventos severos que geraram e geram impactos socioeconômicos significativos. As áreas urbanas são particularmente as mais vulneráveis devido a um grande percentual de áreas impermeáveis, ocupações ribeirinhas e infraestrutura inadequada de drenagem.

Historicamente, o Brasil tem enfrentado eventos de inundação de grande magnitude que expõem fragilidades na infraestrutura de drenagem e na gestão urbana. Em 1855, o rio Itajaí-

Açu subiu cerca de 15 m em 36 h, devastando Blumenau (Mendes, 2012); em março de 1967, o transbordamento de córregos em Caraguatatuba causou 436 óbitos e isolou a cidade durante as cheias de 1979; na bacia do rio Doce foram contabilizados 47.776 desabrigados, 74 mortes e 4.424 residências danificadas, relatado pelo Comitê Da Bacia Hidrográfica Do Rio Doce (CBHRD) em 2024; em junho do ano de 2024, Alagoas e Pernambuco decretaram estado de emergência em mais de 30 municípios, refletindo ocupações em áreas de risco sem adequada drenagem e aumentando drasticamente a vulnerabilidade social, segundo o Ministério Do Desenvolvimento Social (MDS), 2021.

De acordo com o Atlas de Desastres no Brasil, do Ministério da Integração e do Desenvolvimento, entre 2008 e 2023 foram registrados 23.885 eventos climáticos extremos, incluindo alagamentos e enxurradas, resultando em 3.464 mortes e prejuízos financeiros de aproximadamente R\$ 171 bilhões. Em 2024, o Rio Grande do Sul enfrentou uma das maiores catástrofes climáticas da história do país, com chuvas intensas afetando mais de 90% dos municípios do estado, causando 172 mortes e deslocando cerca de 600 mil pessoas. O Relatório Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2023, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), aponta que em 2022 cheias afetaram 1,5 milhão de pessoas no país.

Estima-se que aproximadamente 3.000 km² do território brasileiro sejam hoje classificados como zonas de muito alto e alto risco para deslizamentos, enchentes e enxurradas, abrangendo 825 municípios em condição crítica (Dantas, 2024). Nesses locais, mais de 8 milhões de habitantes, cerca de 75 %, residem em áreas expostas a deslizamentos ou à combinação destes com inundações (Marengo et al., 2023; CEMADEN, 2023). Dados do Censo de 2010 indicam elevada vulnerabilidade social nessa população, e, entre 1º de janeiro de 2013 e 5 de abril de 2022, desastres naturais geraram prejuízos acumulados de cerca de US\$ 67 bilhões em todo o país (CEMADEN, 2023). Esses desastres resultam em aumento da pobreza, insegurança alimentar e deslocamentos forçados, impactando principalmente comunidades marginalizadas. Esses fatores estão sendo corroborados principalmente pelos impactos das mudanças climáticas em eventos de precipitação extrema e no impacto ao ciclo hidrológico, como é relatado pelo sexto relatório de avaliação do IPCC (2023), o qual estas intempéries vêm se tornando cada vez mais frequentes desde a década de 1950, corroborando não só para

problemas ambientais e estruturais, mas impactando o meio físico e emocional da sociedade atingida.

1.4. Eventos de inundações no Nordeste

Segundo dados do Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres - CEPED, o Nordeste brasileiro enfrenta desafios climáticos severos, sendo a região com o maior número de desastres naturais no país, totalizando 37.965 ocorrências entre os anos de 2012 e 2023. Mediante mesmo estudo, a predominância de estiagem e seca (79,04%) evidencia a vulnerabilidade hídrica da região, enquanto enxurradas (2%) e inundações (1,56%) ampliam os riscos socioeconômicos.

Dados da Defesa Civil indicam que os extremos meteorológicos no Nordeste contribuem diretamente para a intensificação de inundações, enxurradas e seca, agravando os prejuízos na região (Ribeiro, 2021). Além disso, análises recentes apontam que as mudanças climáticas aumentaram em 20% a intensidade de chuvas intensas, elevando os riscos de deslizamentos e enchentes. A ocupação de áreas de risco e a falta de infraestrutura adequada tornam a população ainda mais vulnerável aos efeitos desses desastres (Galileu, 2022).

A região Nordeste concentra 40% de todos os desastres naturais registrados no Brasil, dos quais 21% referem-se a inundações (Brasil, 2016, citado por Ribeiro, 2021). Essa mesma região possui 3.460 trechos de rios identificados como suscetíveis a inundações graduais, dos quais 752 (21,7%) apresentam alta vulnerabilidade e 1.750 (50,6%) vulnerabilidade média, segundo o Atlas de Vulnerabilidade a Inundações da ANA (2014). Entre maio e junho de 2022, chuvas intensas atingiram Pernambuco, Alagoas e Paraíba, provocando deslizamentos de terra e inundações repentinas, resultando em 130 mortes e afetando mais de 130 mil pessoas (CEMADEN, 2023). O mesmo estudo também afirma que em 28 de maio de 2022, cerca de 17% da área urbana de Recife foi impactada por enchentes, evidenciando a precariedade da infraestrutura urbana diante de eventos climáticos extremos.

1.5. As inundações no estado de Pernambuco

O estado de Pernambuco apresenta uma das maiores incidências de inundações no Nordeste, sendo fortemente impactado por eventos hidrológicos extremos. Dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) indicam que o estado possui 54 pontos críticos de alagamento monitorados regularmente, com destaque para áreas próximas a rios e regiões de alta densidade urbana. Fatores como impermeabilização do solo, ocupação desordenada e variações na precipitação média diária contribuem para o aumento da vulnerabilidade a inundações (Barros, 2025).

O Rio Capibaribe, um dos principais cursos d'água que atravessam Recife, tem sido fortemente impactado por eventos de inundação nos últimos anos. Em fevereiro de 2025, o rio atingiu a cota de alerta em Recife, Camaragibe e São Lourenço da Mata, indicando risco elevado de extravasamento e impactos urbanos significativos segundo o boletim da APAC (2025). O mesmo estudo também afirma que ao atingir esse nível, a água do rio começa a sair do seu percurso natural, aumentando consideravelmente o risco de inundações. Notícias do Tribuna Online afirmaram que a situação se agravou com as chuvas intensas que atingiram a Região Metropolitana do Recife, elevando o nível do rio e exigindo monitoramento contínuo (Moura, 2025). Esses eventos demonstram a crescente vulnerabilidade da bacia hidrográfica do Capibaribe, reforçando a necessidade de investimentos em infraestrutura e estratégias de adaptação para mitigar os impactos das inundações na região.

1.6. O avanço de tecnologias em confrontação aos desafios eventos hídricos extremos

O avanço acelerado da urbanização tem intensificado problemas hidrológicos, como alagamentos e enchentes, devido à substituição de áreas naturais por superfícies impermeáveis, o que reduz a infiltração no solo e amplia o escoamento superficial. Esse cenário tem motivado um crescimento nas pesquisas voltadas para a gestão dos recursos hídricos, análise de eventos extremos e planejamento do uso e cobertura do solo. Os impactos são ainda mais severos em bacias hidrográficas de pequena extensão situadas em áreas densamente urbanizadas, onde o tempo de concentração do escoamento é reduzido, resultando em respostas hidrológicas rápidas

e aumento significativo dos riscos de inundações (Tucci e Bertoni, 2003, citado por Dantas, 2024).

Apesar dos avanços tecnológicos, a gestão de áreas de risco no Brasil ainda esbarra em falhas de governança e na baixa integração entre órgãos, o que reduz a efetividade da prevenção (Castro, 2022). A carência de dados históricos consistentes e de sistemas de informação interoperáveis limita a qualidade do monitoramento, do alerta e dos modelos preditivos (Fonseca et al., 2023). O ordenamento territorial frequentemente privilegia metas de crescimento econômico sem incorporar gestão de riscos, alimentando a expansão urbana em encostas, várzeas e fundos de vale (Drumond, 2023). Esse quadro é agravado pela baixa implementação de Planos Municipais de Redução de Riscos, que mantém elevada a exposição e a vulnerabilidade (Mendonça, 2023). A recorrência de extremos recentes, com chuvas excepcionais e impactos sem precedentes, reforça a urgência de integrar adaptação climática, planejamento urbano e proteção social nas políticas públicas (Marengo, 2024). No cenário sul-brasileiro de 2024, por exemplo, o padrão de precipitações e danos estabelece um novo patamar de risco e evidência para medidas preventivas (Collischonn, 2024).

Atualmente, existem mais de 23 mil estações pluviométricas e fluviométricas cadastradas; porém, apenas 4.700 pontos são monitorados diretamente pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), o que limita a cobertura nacional; o Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE) realiza o monitoramento de chuvas e dos níveis dos rios em diversas bacias hidrográficas, mas ainda depende de infraestrutura limitada para transmissão dos dados. Esses dados demonstram que, apesar dos avanços, o monitoramento hidrológico brasileiro ainda enfrenta limitações que afetam a eficiência da gestão dos recursos hídricos e da mitigação dos impactos socioambientais (ANA, 2025).

O monitoramento ambiental em larga escala tem se apoiado, cada vez mais, no uso de tecnologias avançadas capazes de acompanhar mudanças no território ao longo do tempo. Nesse contexto, destacam-se o sensoriamento remoto e o geoprocessamento, que se consolidaram como ferramentas indispensáveis para análises espaciais e ambientais. O sensoriamento remoto permite obter informações sobre grandes áreas por meio de sensores instalados em satélites, drones ou aeronaves, gerando dados periódicos que viabilizam o acompanhamento de transformações na superfície terrestre. Por sua vez, o geoprocessamento reúne um conjunto de

métodos e procedimentos que possibilitam coletar, armazenar, tratar e interpretar informações geográficas de maneira precisa, utilizando como base os Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Essas ferramentas são frequentemente integradas a modelos digitais que representam a tanto a realidade da superfície, tanto do relevo, como os Modelos Digitais de Elevação (MDE) e os Modelos Digitais de Terreno (MDT), que oferecem representações tridimensionais da paisagem. Com isso, é possível realizar análises topográficas detalhadas, calcular volumes, delimitar bacias hidrográficas, identificar áreas suscetíveis a inundações, deslizamentos e outros riscos ambientais. A melhoria na resolução das imagens de satélite permite identificar detalhes antes imperceptíveis, possibilitando com maior exatidão o mapeamento de cursos d'água, áreas de inundação, microbacias e entender melhor o escoamento superficial, principalmente em áreas urbanas. Dessa forma, essa evolução permite coletar, tratar e analisar dados geoespaciais com alta precisão e um maior detalhamento.

O sensoriamento remoto por LiDAR (*Light Detection and Ranging*) tem promovido avanços significativos na análise de ambientes hidrológicos ao possibilitar a aquisição de modelos tridimensionais de alta resolução espacial. Sua capacidade de capturar desníveis mínimos no terreno com precisão altimétrica centimétrica viabiliza a representação detalhada da morfologia fluvial, incluindo leitos, margens, canais e microbacias, elementos fundamentais para a compreensão da dinâmica de escoamento superficial. Esses atributos tornam o LiDAR uma ferramenta essencial na geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) e Modelos Digitais de Terreno (MDT) para aplicações como a modelagem hidrodinâmica, a delimitação de planícies de inundação e a análise de suscetibilidade a eventos extremos (Mira et al., 2023; UNESP, 2025).

Em escalas regionais e continentais, os sensores orbitais ópticos têm desempenhado papel complementar no monitoramento ambiental, especialmente em uma análise temporal de uso e cobertura da terra, mapeamento de superfícies inundadas e caracterização de áreas de risco. Satélites como o Landsat, com resolução espacial de 30 metros, e o Sentinel-2, com resoluções de 10, 20 e 60 metros, oferecem séries históricas consistentes e cobertura sistemática, sendo amplamente utilizados em estudos hidrológicos de larga escala. No entanto, os MDEs oriundos desses sensores apresentam limitações altimétricas expressivas, com erros médios variando de 6 a 16 metros, o que compromete a acurácia em aplicações que exigem

detalhamento morfológico fino (Gonçalves et al., 2016; Santos et al., 2017). Nesse contexto, o LiDAR destaca-se como a principal tecnologia para o mapeamento de alta precisão de feições hidrológicas, sendo indispensável em contextos urbanos ou topograficamente complexos.

1.7. Modelos hidrológicos e hidrodinâmicos

A aplicação de modelos numéricos voltados à hidrologia e à hidráulica é fundamental para compreender o comportamento dos rios, permitindo a análise de diferentes cenários e fornecendo subsídios técnicos que orientam o planejamento, a gestão e a tomada de decisão em áreas sujeitas a riscos hidrológicos. Esses instrumentos científicos possibilitam traduzir em simulações os processos que ocorrem nas bacias hidrográficas, fornecendo informações sobre disponibilidade hídrica, cheias, qualidade da água e funcionamento de estruturas.

No campo hidrológico, desta-se o SWAT (Soil and Water Assessment Tool), um modelo hidrológico semi-distribuído, de base física e contínuo, que subdivide bacias em HRUs para representar a heterogeneidade de solo, uso da terra e topografia, simulando balanço hídrico, escoamento, sedimentos e nutrientes em longo prazo (Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2011). Amplamente usado no mundo, no qual permite avaliar cenários de uso e manejo, impactos climáticos e qualidade da água em apoio à gestão integrada. Sua estrutura combina processos em escala de bacia com séries climáticas observadas ou simuladas, possibilitando uma série de análises globais. O modelo permite a análise de diferentes variáveis hidrológicas e climáticas, dentre elas se destacam a quantificação de vazões simuladas em escalas temporais, a qualidade da água e assim como, processos de sedimentação e erosão. A utilização da análise comparativa entre vazões simuladas permite uma visualização ampla da tendência hidrológica de qualquer região, sendo primordial principalmente em áreas que carecem de estruturas e dados hidrológicos, que são ferramentas essenciais em projetos e planejamentos urbanos e ocupações sociais.

No campo hidrodinâmico, uma das soluções mais difundidas é o River Analysis System (HEC-RAS), desenvolvido pelo United States Army Corps of Engineers (USACE), através do Hydrologic Engineering Center (HEC), em Davis, Califórnia. Esse ambiente computacional é voltado à análise da dinâmica fluvial e ao estudo de risco de inundações, sendo capaz de simular

diferentes condições de escoamento em canais naturais ou artificiais. A ferramenta permite desde simulações em regime permanente, de comportamento mais estável e simplificado, até simulações em regime não permanente, representando variações temporais do fluxo (USACE, 2002, citado por Dantas, 2024). Também possibilita a geração de mapas de zonas inundáveis, a propagação de ondas de cheia, a avaliação do transporte de sedimentos e análises em diferentes dimensões, ampliando sua aplicabilidade em projetos de engenharia fluvial, mitigação de riscos e planejamento de infraestrutura hidráulica (USACE, 2002; Dantas, 2024). Além disso, o modelo permite atribuir a avaliação de manchas de inundações na aplicação de diferentes cenários, resultando em análises comparativas no comportamento quantitativo da lâmina de água.

A aplicação de modelos preditivos em regiões que carecem de dados hidrológicos e sofrem impactos constantemente de eventos como inundações, enxurradas e alagamentos são essenciais para modelar o comportamento do escoamento e de como ele se relaciona com áreas no entorno, sendo essenciais para tomadas de decisões em projetos sociais e planejamentos de organização territorial.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

- Mapear manchas de inundações em um trecho do rio Capibaribe - Recife/PE, a partir da obtenção de vazões simuladas mediante modelagem hidrológica.

2.2. Objetivos específicos

- Desenvolver a modelagem hidrológica da bacia contribuinte utilizando o modelo SWAT + para geração das séries de vazões.
- Calibrar as vazões simuladas no modelo SWAT utilizando dados mensais no intervalo de 1987 a 2025 observados *in loco*.

- Aplicar as vazões geradas no SWAT no modelo hidrodinâmico HEC-RAS, para simular a propagação das cheias no trecho urbano do Rio Capibaribe, com aplicação de uma análise comparativa entre cenários atribuídos.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Para obter uma série de vazões em ambiente de modelagem hidrológica, são necessários dados, parâmetros e pressupostos de naturezas distintas. Parte desses insumos é medida diretamente (p. ex., precipitação e temperatura), enquanto outra parte decorre de estimativas baseadas em levantamentos de campo e posterior tratamento computacional. Em termos espaciais, o ponto de partida costuma ser a morfometria do terreno, que organiza a rede de drenagem e condiciona a conectividade hidrológica; em seguida, entram a representação do uso e cobertura da terra e das classes de solo, a partir das quais se definem unidades relativamente homogêneas de resposta. Por fim, as séries climáticas acionam os processos de infiltração, escoamento superficial, evapotranspiração e contribuição subterrânea, cuja combinação e roteamento ao longo dos cursos d'água resultam nos hidrogramas nos pontos de interesse.

A construção dessa série demanda escolhas metodológicas: o nível de detalhamento espacial, os limiares para agregar classes, as regras de manejo atribuídas às diferentes coberturas e os intervalos temporais de simulação (Neitsch et al., 2011). Em cenários com lacunas em dados observados, recorre-se a técnicas de preenchimento ou a bases climatológicas consolidadas (WMO, 2008); quando há observações locais confiáveis, privilegia-se sua incorporação. A qualidade do resultado é verificada por meio de métricas que avaliam aderência temporal, tendência e variabilidade entre séries simuladas e observadas, além de verificações de balanço hídrico e assinaturas sazonais. Essas etapas, combinadas a ajustes finos de parâmetros sensíveis, permitem que a série de vazões represente, com transparência e reprodutibilidade, o comportamento hidrológico da bacia em diferentes condições climáticas e de uso do solo (MORIASI et al., 2015).

3.1. Caracterização da bacia do rio Capibaribe

A bacia do rio Capibaribe tem uma área territorial de aproximadamente 745 mil hectares e está localizada na região Nordeste do estado de Pernambuco, localizada entre as coordenadas 07° 41' 20" e 08° 19' 30" de latitude sul, e 34° 51' 00" e 36° 41' 58" de longitude oeste. O Rio Capibaribe tem sua nascente na divisa entre Jataúba e Poção, seguindo um percurso que atravessa diversas áreas urbanas e recebendo resíduos industriais e domésticos ao longo de seu trajeto. Inicialmente, corre na direção sudeste-nordeste, mas ao se aproximar de Santa Cruz do Capibaribe, altera seu curso para oeste-leste, percorrendo aproximadamente 280 km até desaguar no Recife. Em alguns trechos, serve como limite entre municípios, como Santa Cruz do Capibaribe e Brejo da Madre de Deus. Seu regime fluvial é intermitente nas partes alta e média do rio, tornando-se perene a partir do município de Limoeiro. Entre seus principais afluentes da margem direita estão o riacho do Mimoso, riacho Tabocas, riacho da Onça, riacho Carapatós, riacho das Éguas, riacho Caçatuba, riacho Batatã, rio Cotumgubá, rio Goitá e rio Tapacurá; pela margem esquerda, recebe contribuições do riacho Jataúba, riacho Doce, riacho Topada, riacho do Manso e riacho Cajaí (APAC, 2025).

3.2. Topografia

A representação da topografia é a base sobre a qual se organizam os processos de água na paisagem. É ela que estabelece a hierarquia dos cursos d'água, os caminhos preferenciais do escoamento e os gradientes que sustentam a energia do sistema. Ao traduzir e processar dados quantitativos do relevo em ferramentas de geoprocessamento, torna-se possível delimitar bacias, estruturar redes de drenagem e compreender como a chuva se reparte entre infiltração, escoamento superficial e armazenamento subterrâneo ao longo do tempo (Jenson et al., 1988; Mark, 1984; Barnes; Lehman; Mulla, 2014).

As informações levantadas em campo funcionam como referência geométrica para todo o restante. Campanhas topográficas bem planejadas com medições planialtimétricas, perfis de terreno e seções transversais ancoram o modelo em medidas precisas, revelando desníveis sutis, taludes, diques naturais e calhas secundárias que condicionam a dinâmica de rios e corpos d'água. Além de descrever a forma, essas observações permitem controles de qualidade,

verificando consistência de altitudes, marcos de referência e a coerência entre diferentes fontes de dados (Mueller; Hofmann-Wellenhof; Wasle, 2008; ISO, 2015).

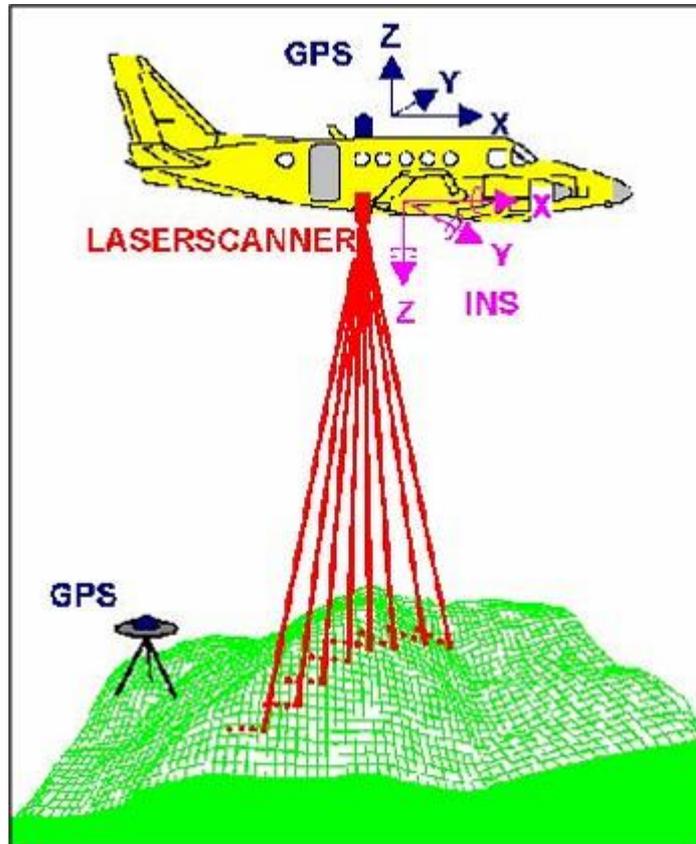
A observação remota amplia o alcance espacial e temporal do comportamento do terreno. A partir de imagens de satélites, constroem-se superfícies altimétricas contínuas que cobrem extensas regiões de forma homogênea, com atualizações periódicas. Esses produtos possibilitam análises regionalizadas, viabilizam a comparação entre bacias e apoiam estudos em áreas onde o acesso é limitado. Ao mesmo tempo, exigem tratamento cuidadoso como correções para efeitos de cobertura vegetal e edificações, remoção de depressões artificiais e validação pontual com medidas de campo (Yamazaki et al., 2017).

Quando o objetivo demanda maior fidelidade geométrica, o nível de detalhe passa a ser decisivo. Pequenos detalhes do relevo como degraus, cristas, talvegues rasos e descontinuidades em planícies têm papel primordial na direção dos fluxos, na extensão de áreas alagáveis e na conectividade hidráulica. Nesses contextos, soluções de maior resolução e densidade de pontos tornam-se preferenciais, com destaque para a varredura a laser aerotransportada como é o caso do LIDAR e ARP's, que permite separar terreno de cobertura e produzir modelos altimétricos refinados, capazes de sustentar simulações e diagnósticos com maior confiabilidade (Prior et al., 2024)

3.3. Imagens LiDAR

O LiDAR é a principal tecnologia de varredura a laser usada em sensoriamento remoto atualmente. Normalmente é embarcado em aeronaves (tripuladas ou VANTs) e funciona como um sensor ativo, permitindo pulsos de laser em alta frequência na direção do terreno enquanto se desloca ao longo da rota de voo. Quando o feixe atinge um alvo, parte da energia retorna ao sensor; medindo o tempo de voo entre a emissão e o retorno, e sabendo que a luz viaja a uma velocidade conhecida, o equipamento calcula a distância até o objeto. Para transformar essas distâncias em posições no espaço, o sistema combina as medições do laser com a posição do GPS (GNSS) e a orientação do conjunto fornecida pela unidade inercial (IMU), sendo o resultado um levantamento preciso da superfície, pronto para gerar modelos e mapas 3D (Quartaroli, 2014).

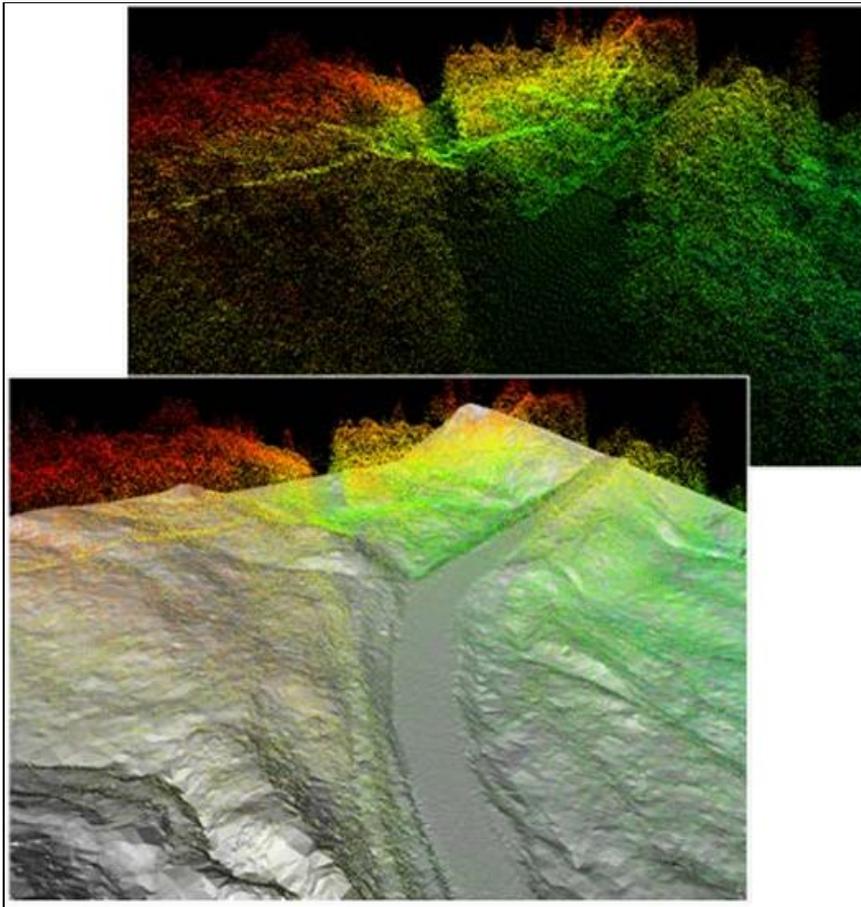
Figura 1 - Coleta de dados do LiDAR em aeronaves



Fonte: NOAA, 2012.

O método de sensoriamento remoto ativo lança pulsos de laser (Figura 1) a partir de aeronaves (tripuladas ou VANTs) e mede o tempo de retorno da luz para estimar distâncias, gerando modelos 3D muito detalhados do terreno e da cobertura. Em termos práticos, o sistema combina o laser com posicionamento e atitude da plataforma para produzir nuvens de pontos que servem de base para mapas, estudos hidrológicos e planejamento territorial.

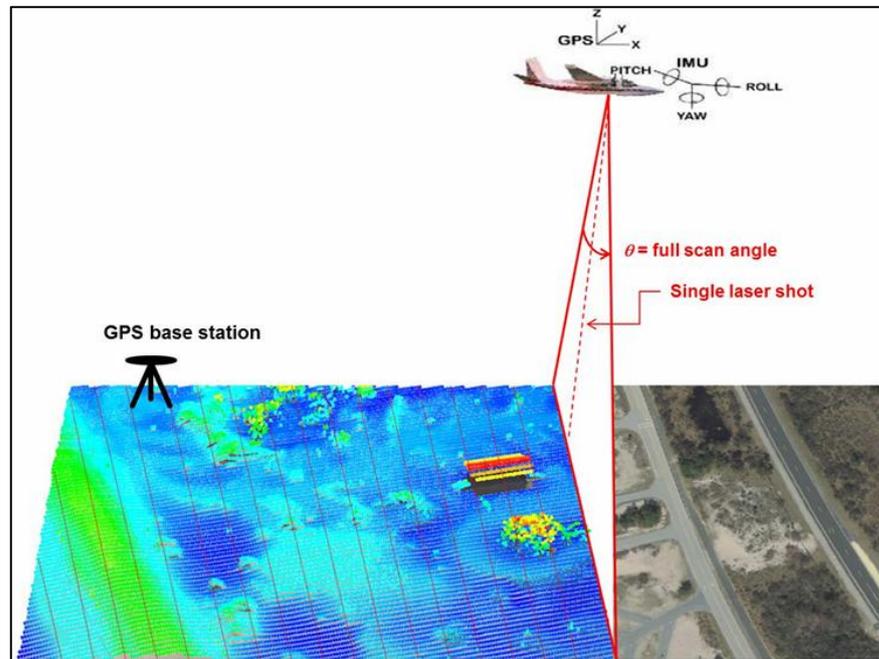
Figura 2. Representação das nuvens de pontos no relevo por meio do LiDAR



Fonte: NOAA, 2012.

O LiDAR é análogo ao radar (detecção e alcance por rádio), porém opera com pulsos discretos de luz laser. As coordenadas tridimensionais dos alvos (x, y, z; ou latitude, longitude e elevação) são determinadas a partir de (1) o tempo de ida e volta do pulso (time-of-flight), (2) o ângulo de disparo do feixe e (3) a posição absoluta do sensor em relação à superfície terrestre (via GPS/IMU), permitindo calcular com precisão o alcance e a posição dos pontos medidos (US, 2012).

Figura 3. Ilustração de um imageamento por LiDAR.



Fonte: NOAA, 2012

É realizado por meio da varredura lateral de pulsos laser, que formam faixas de cobertura no solo sobrepostas ao longo da rota de voo. Cada disparo pode gerar múltiplos retornos, registrando desde o topo da vegetação até o solo, o que permite separar o Modelo Digital da Superfície (MDS) do Modelo Digital do Terreno (MDT). A posição da aeronave é obtida pelo GPS diferencial, enquanto a IMU registra a orientação (pitch, roll e yaw) do sensor. A combinação dessas informações atribui coordenadas tridimensionais (x , y , z) precisas a cada ponto. O resultado é uma nuvem de pontos georreferenciada, classificada em categorias como solo, vegetação e edificações. Esses dados possibilitam a produção de modelos 3D detalhados, curvas de nível e outros produtos cartográficos de alta resolução (Fernandez-Diaz et al., 2014)

Cada aspecto mencionado torna o LiDAR fundamental em estudos hidrológicos, fornecendo modelos digitais do terreno (MDT) de alta resolução, capazes de representar até micro-relevos que controlam o escoamento superficial, a delimitação de bacias e a rede de drenagem. Sua precisão permite identificar canais efêmeros, áreas de acumulação e zonas de inundação com maior confiabilidade do que DEM's convencionais. Além disso, possibilita gerar insumos detalhados para modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, como declividade, comprimento de vertentes e seções transversais de rios, aumentando a acurácia de simulações de vazão, mancha de inundações, cheias e processos erosivos.

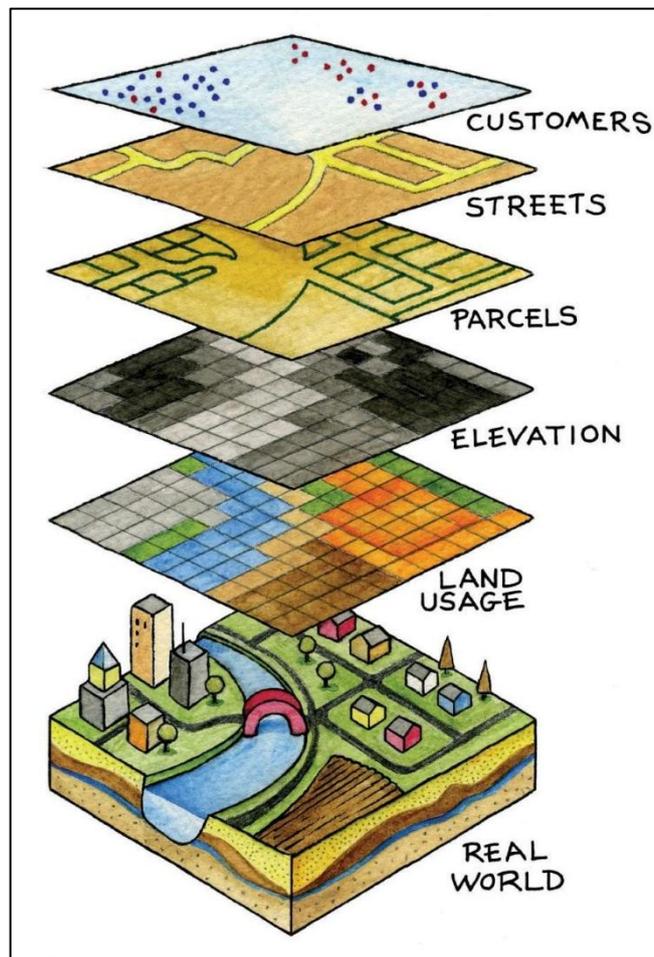
3.4. Sistemas de Informação Geográfica (SIGs)

O avanço das tecnologias de sensoriamento remoto e de levantamentos topográficos trouxe um crescimento exponencial no volume de informações espaciais disponíveis. Trabalhar com esse conjunto de dados que abrange desde imagens de satélite até levantamentos aerotransportados de alta resolução exige programas especializados capazes de organizar, processar e analisar grandes bases de dados. Nesse contexto, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) se consolidaram como ferramentas essenciais, pois oferecem infraestrutura para integrar dados de naturezas distintas, permitindo análises espaciais complexas com confiabilidade e eficiência (Longley et al., 2015; ESRI, 2020).

Dentro desse ambiente, um dos formatos mais empregados é o raster, que representa o espaço como grades regulares de células ou pixels, cada qual com um valor associado. Essa estrutura é especialmente útil para lidar com dados contínuos, como altitude, precipitação ou índices de vegetação. O uso de rasters de alta resolução espacial em SIG permite análises mais detalhadas do relevo, simulações hidrológicas mais realistas e maior precisão na identificação de áreas críticas, como zonas de alagamento e de susceptibilidade à erosão. Além disso, softwares especializados viabilizam o processamento eficiente desses grandes conjuntos de pixels, garantindo a consistência matemática e espacial dos resultados (Burrough; McDonnell; Lloyd, 2015; Goodchild, 2018).

Nos estudos hidrológicos, a utilização de SIG assume papel ainda mais relevante, pois possibilita a integração entre dados espaciais e modelos matemáticos. Nos SIGs, a utilização de várias camadas (Figura 3) permite integrar dados distintos, como relevo, uso do solo e infraestrutura. Essa abordagem possibilita análises mais completas e suporte eficiente ao planejamento e à gestão territorial. A partir dessas camadas, é possível estruturar modelos hidrológicos semi-distribuídos, como o SWAT, que simulam processos de infiltração, escoamento superficial e transporte de sedimentos. O SIG, portanto, não apenas organiza as informações de entrada, mas também apoia a interpretação dos resultados, tornando-se indispensável na calibração, validação e aplicação de modelos hidrológicos em escalas de bacia hidrográfica (Arnold et al., 2012).

Figura 4. Análise de múltiplas camadas no QGIS.



Fonte: PINTOR, 2022.

3.5. Modelos hidrológicos

Modelagem hidrológica é o uso de modelos matemáticos ou computacionais para simular os processos de ciclo da água numa bacia: precipitação, infiltração, escoamento superficial, recarga de aquíferos, evapotranspiração e transporte de sedimentos e nutrientes. Esses modelos são importantes porque permitem prever como a bacia responderá sob diferentes cenários.

A modelagem hidrológica encontra aplicações em variadas escalas, desde pequenos estudos locais para manejo agrícola até grandes bacias para previsão de vazões de cheias,

controle de qualidade da água ou avaliações de risco hídrico. Por exemplo, modelos distribuídos ou semi-distribuídos são usados para simular como diferentes subbacias contribuem para a vazão total, para entender como variáveis climáticas ou de solo afetam temporal e espacialmente os fluxos hídricos. Na prática, esses modelos também se tornam ferramentas de apoio à tomada de decisão de gestores e órgãos ambientais, pois permitem antecipar cenários e planejar ações preventivas ou de mitigação em situações críticas, além de representarem uma alternativa essencial em regiões onde não existem postos fluviométricos, fornecendo estimativas de vazões em áreas desprovidas de monitoramento direto.

Uma das principais saídas dos modelos hidrológicos é a série temporal de vazões simuladas, que representa o hidrograma de saída (escoamento gerado pela bacia) em escalas anuais, mensais, diárias ou até horárias. Esses hidrogramas simulados são essenciais para calibrar e validar o modelo com dados observados, para estimar picos de cheia, secas e variações sazonais. Estudos recentes mostram que modelos conceituais ou semi-distribuídos conseguem representar bem as vazões médias e picos se calibrados apropriadamente, e que a incerteza em simulações de vazão é sensível à parametrização do solo, uso da terra, processamento de chuva e escolha dos períodos de simulação (ROZOS et al., 2023; LANE et al., 2019).

Dentre os diversos modelos hidrológicos, destaca-se o Soil and Water Assessment Tool (SWAT), desenvolvido pelo United States Department of Agriculture (USDA), por meio do Agricultural Research Service (ARS), no Grassland, Soil and Water Research Laboratory, em Temple, Texas. Esse sistema é distribuído, de base física e contínua, sendo amplamente utilizado para representar os processos de uma bacia hidrográfica ao longo do tempo. Sua estrutura permite simular o balanço hídrico, a geração de escoamento superficial, o transporte de sedimentos e a dinâmica de nutrientes, incorporando a interação entre solo, clima e uso da terra. Além disso, o programa possibilita avaliar impactos de diferentes cenários de ocupação, práticas de manejo e mudanças climáticas sobre a quantidade e a qualidade da água. Por ser orientado a simulações de longo prazo, constitui uma das principais ferramentas de apoio à conservação ambiental e à gestão de recursos hídricos, sendo reconhecido internacionalmente como referência em modelagem integrada (Arnold et al., 1998).

A utilização do SWAT também se mostra especialmente relevante em regiões onde não existem dados hidrológicos observados, como séries de vazões fluviométricas. Nessas situações, o modelo pode ser calibrado com informações climáticas, tipos de solo e de uso do solo, permitindo a geração de séries de vazões simuladas que servem como referência para estudos hidrológicos e de planejamento.

A possibilidade de testar cenários múltiplos, considerando diferentes condições de uso do solo e variabilidades climáticas, torna essas ferramentas indispensáveis não apenas para o planejamento territorial, mas também para o dimensionamento de obras hidráulicas e para a formulação de estratégias de adaptação às mudanças climáticas. Com isso, contribuem de maneira direta para a redução da vulnerabilidade socioambiental e para a construção de cidades mais resilientes.

Dessa forma, essa capacidade é fundamental em países em desenvolvimento, onde a rede de monitoramento é frequentemente escassa ou descontinuada. Assim, o SWAT se consolida como uma ferramenta estratégica para estimar a disponibilidade hídrica e apoiar decisões em áreas críticas, garantindo que análises de risco hídrico, planejamento de obras hidráulicas e avaliação de cenários de mudança climática possam ser realizados mesmo na ausência de registros fluviométricos diretos.

3.6. Modelos de simulação de manchas de inundação

Os modelos hidrodinâmicos são ferramentas computacionais que permitem simular o escoamento da água em rios, canais e áreas alagáveis, considerando tanto a geometria do leito como as condições hidráulicas de contorno. Eles são fundamentais porque descrevem o comportamento do fluxo em regime permanente ou variável, permitindo compreender processos como níveis d'água, velocidades, tempos de propagação e interações entre o canal e a planície de inundação. Dessa forma, tornam-se instrumentos essenciais para o planejamento de obras hidráulicas, a gestão de riscos de cheias, a proteção de populações ribeirinhas e a definição de políticas de ocupação do solo em áreas suscetíveis (Chow; Maidment; Mays, 1988).

Entre os diversos modelos disponíveis, o HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) se destaca por ser amplamente difundido e consolidado em estudos de engenharia e recursos hídricos. Desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers, o HEC-RAS permite a simulação de escoamentos unidimensionais e bidimensionais, incorporando dados topográficos, batimétricos e hidrológicos para representar a propagação das ondas de cheia. Além de sua interface amigável, o software é gratuito, o que explica sua grande utilização acadêmica e profissional em diferentes países, inclusive no Brasil (USACE, 2002).

O emprego dessas plataformas, quando associado a dados espaciais de alta resolução, como aqueles derivados de sensoriamento remoto e LiDAR, potencializa significativamente a precisão das análises. A integração entre modelos numéricos e informações geoespaciais detalhadas favorece a caracterização do relevo, da rede de drenagem, da ocupação do solo e das áreas mais suscetíveis a inundações. Essa abordagem fortalece a capacidade de prever respostas hidrológicas diante de eventos extremos, como enchentes, oferecendo suporte técnico consistente para a elaboração de planos de mitigação, delimitação de zonas de risco e aperfeiçoamento de sistemas de alerta precoce.

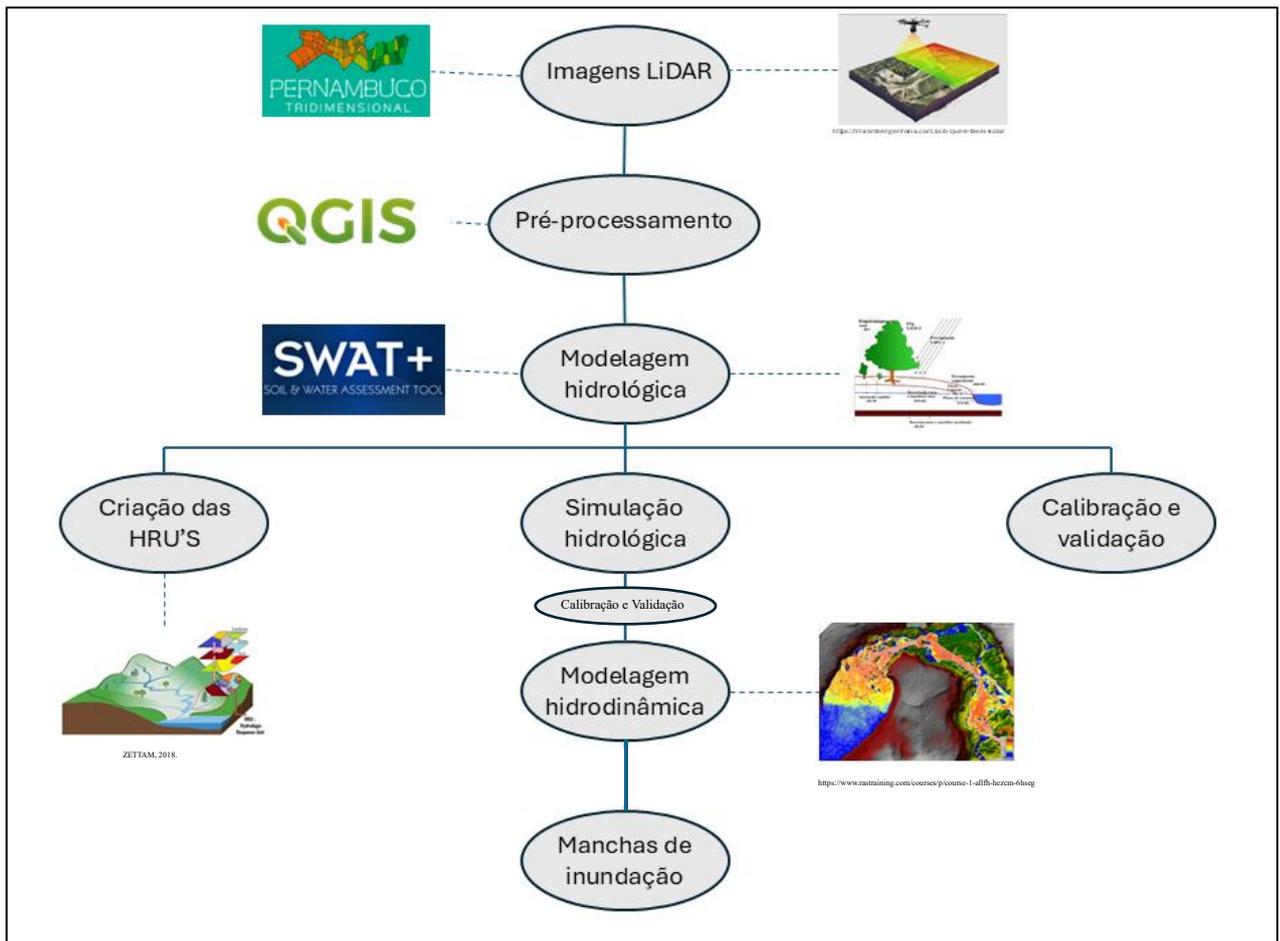
Dessa forma, vê-se que a aplicação do HEC-RAS na delimitação de mancha de inundação é de grande relevância, possibilitando a identificação de áreas potencialmente alagáveis em diferentes cenários de cheias. Essa informação é crucial para o ordenamento territorial, elaboração de planos de emergência, definição de áreas seguras para ocupação e dimensionamento de estruturas de proteção contra enchentes. Em locais onde há histórico de inundações ou ausência de monitoramento sistemático, a modelagem hidrodinâmica com HEC-RAS fornece subsídios técnicos confiáveis para mitigar riscos e orientar tomadas de decisão (Teng et al., 2017; Muthusamy et al., 2021).

4. METODOLOGIA

O presente trabalho tem a aplicação de duas metodologias, a primeira refere-se ao processamento do modelo hidrológico SWAT Plus para geração de vazões simuladas em uma bacia delimitada, e a segunda com a aplicação destes dados de entrada no modelo HEC-RAS,

com intuito de realizar a simulação de mancha de inundação em um trecho urbano do Rio Capibaribe, localizado na cidade de Recife – PE. Antes da realização da modelagem hidrológica, houve a preparação e pré-processamento dos dados climatológicos e do MDT pertencentes a bacia. Para uma melhor compreensão, a Figura 5 ilustra o fluxograma da metodologia.

Figura 5. Fluxograma da metodologia



Fonte: Autor, 2025.

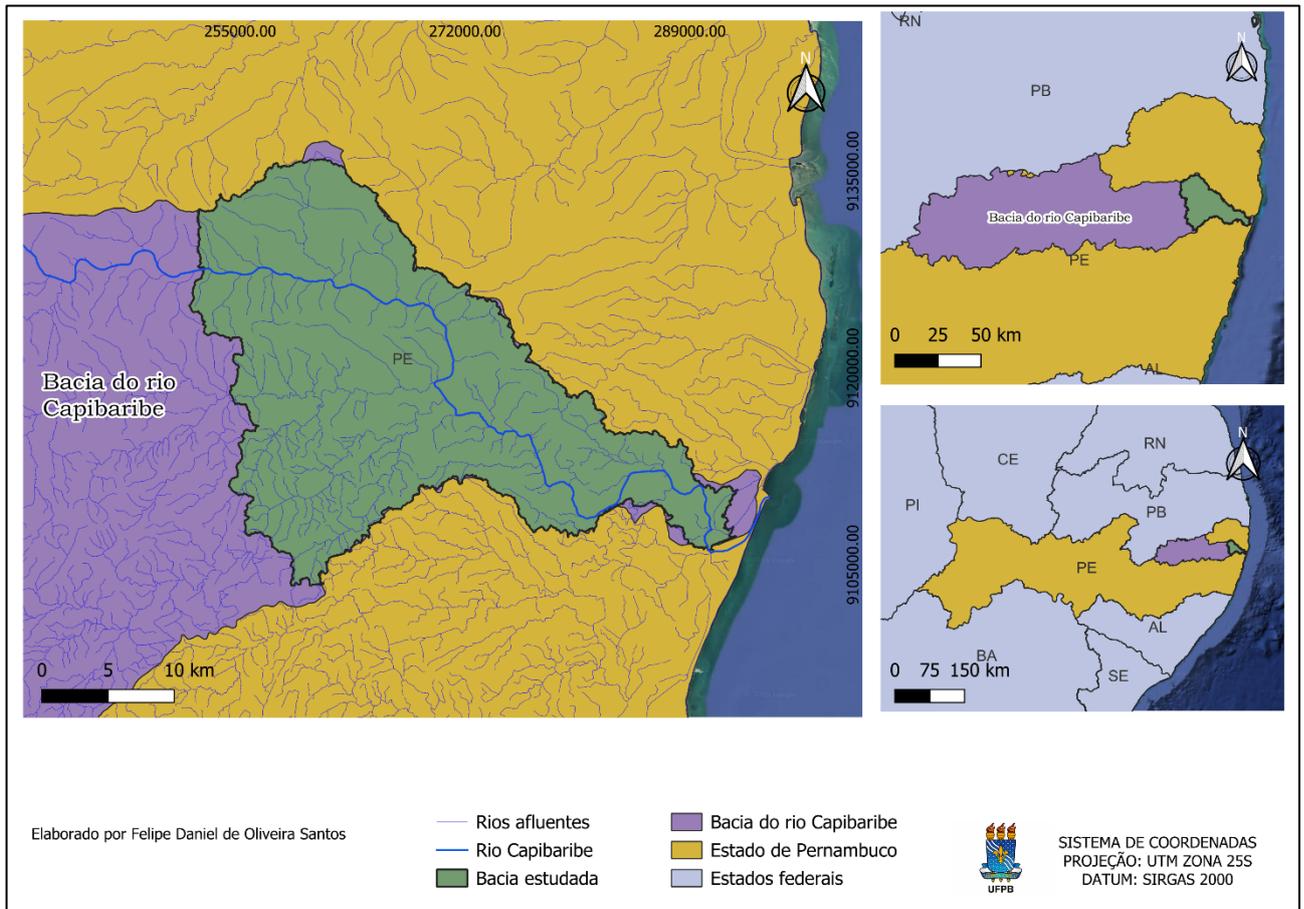
4.1. Descrição da área de estudo

4.1.1. Área de estudo

A área de estudo corresponde a uma bacia hidrográfica delimitada, localizada região Metropolitana de Recife, estado de Pernambuco (Figura 6). A bacia foi delimitada no software SIG, a partir da rede de drenagem extraída do MDT, considerando critérios hidrológicos e topográficos.

A bacia apresenta uma área de 63 mil hectares, tendo como extensão do rio principal aproximadamente 63 km, seu regime fluvial é perene e banhado por 28 afluentes dentro da cidade do Recife, sendo seus principais o rio Goitá, rio Tapacurá, rio Beberibe e rio Tejió (Gouveia, 2018). O trecho intercepta a região central da cidade de Recife, atravessando os bairros Várzea, Caxangá, Apipucos, Monteiro, Poço da Panela, Santana, Casa Forte, Torre, Capunga, Derby e Madalena.

Figura 6. Mapa de localização da sub bacia do Rio Capibaribe.



Fonte: Autor, 2025.

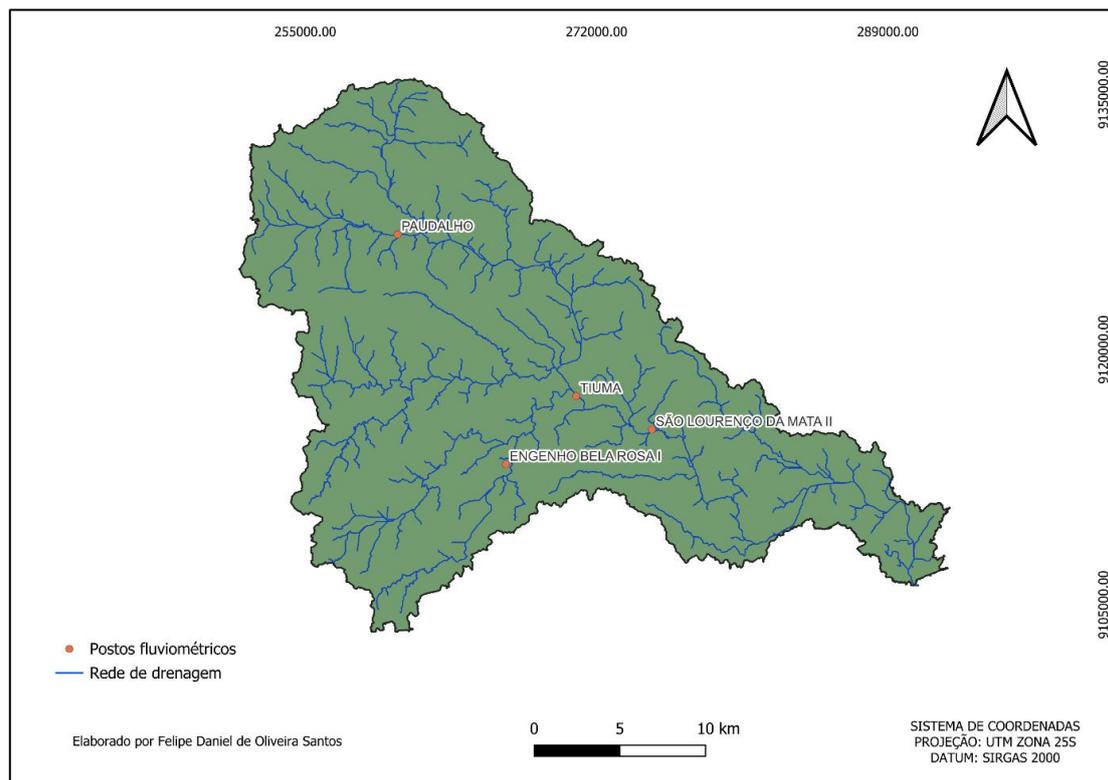
4.1.2. Clima

Segundo o Atlas climatológico do estado de Pernambuco, elaborado pela APAC, os dados foram obtidos por meio de estações climatológicas distribuídas pelo estado, considerando 30 anos de dados observados (1991-2021). A precipitação média mensal da bacia do rio Capibaribe é de 206 mm, apresentando os maiores valores principalmente em áreas litorâneas, como a Região Metropolitana de Recife. A temperatura média anual é de 25°C; temperatura mínima média anual é de 22°C, e temperaturas máxima média anual de 30°C. A umidade relativa média do ar é de 78,30%. A evapotranspiração potencial anual varia entre 1.550 e 1.650 mm. Segundo o mesmo documento, a classificação climática de Koppen-Geiger a montante da bacia

é AS'a (Clima tropical de chuvas entre outono e inverno), e AMA (Clima tropical de monção) entre a região intermediária e jusante da bacia.

4.1.3. Rede de drenagem e postos fluviométricos

Figura 7. Mapa de localização dos postos fluviométricos da sub bacia do rio Capibaribe.



Fonte: Autor, 2025.

A bacia apresenta quatro postos fluviométricos, sendo eles o posto de Tiuma, São Lourenço da Mata, Paudalho e Engenho Bela Rosa I, todos estando nas proximidades do rio. A estação escolhida para a realização do presente trabalho foi a de São Lourenço da mata, sendo o posto mais a jusante da bacia, com coordenadas de $7^{\circ}59'54,96''$ S e $35^{\circ}2'21,12''$ O.

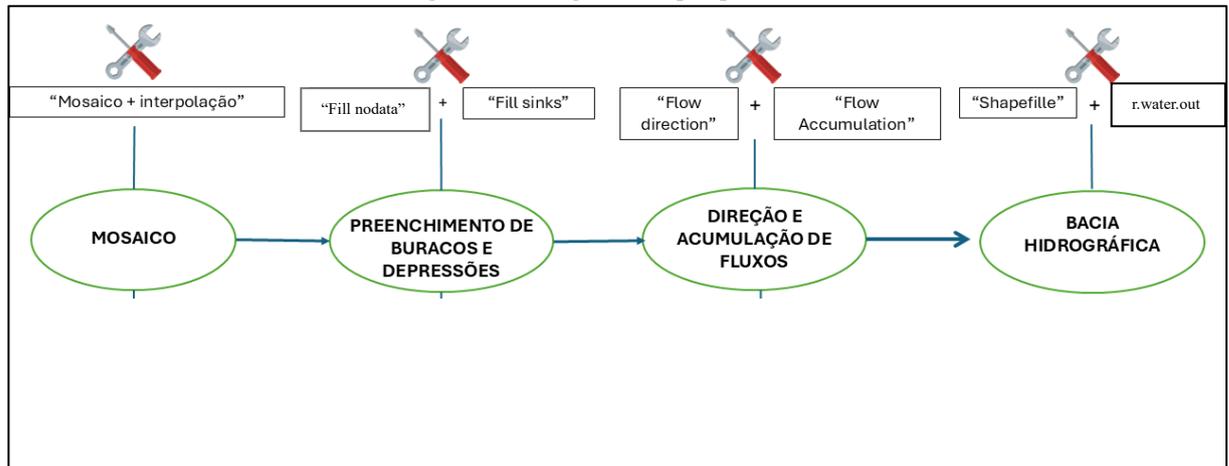
4.1.4. Aquisição de imagens LiDAR

Para representação do modelo digital do terreno (MDT) da bacia, foi realizado a obtenção de imagens LiDAR por meio da plataforma PE3D (Pernambuco Tridimensional), onde o usuário tem a escolha de baixar os dados MDT por meio de quadriculas ou mediante a seleção dos municípios de interesse. Dessa forma a escolha destas imagens, foram baseadas nas cidades localizadas na região Metropolitana de Recife, que é onde o percentual de áreas urbanas são maiores no entorno do rio Capibaribe. Foi realizado o download das imagens que abrangem os municípios de Chã de Alegria, Abreu e Lima, Tracunhaém, Paudalho, São Lourenço da Mata, Jaboatão dos Guararapes, Carpina, Lagoa de Itaenga, Moreno, Vitória de Santo Antão, Camaragibe e em Recife. A escolha dessas cidades foi motivada pelo crescente número de eventos de inundação na bacia que abrange boa parte da região Metropolitana de Recife, onde sofre com altas frequências de eventos de inundação.

4.1.5. Pré-processamento das imagens

O pré-processamento foi realizado integralmente no QGIS 3.40, onde inicialmente foi realizado a mesclagem das imagens LIDAR por meio da ferramenta “mosaico”. Posteriormente, devido à dificuldade de criação da rede de drenagem utilizando a resolução 1m x 1m originária do LIDAR, foi feito uma reamostragem do raster para uma resolução de 4m x 4m. Para a criação da rede de drenagem, foi utilizado primeiramente as ferramentas *Fill nodata (GDAL)*, e *fill sinks (SAGA)* para preenchimento de buracos e depressões no raster, respectivamente. Posteriormente, foram utilizadas as ferramentas *flow Direction (SAGA)*, para criação do fluxo de drenagem, e *flow accumulation*, que mostra os pontos de maiores acumulação de escoamento, ou seja, resultando em locais com maiores quantidades de água, permitindo a melhor visualização dos canais. Para a delimitação da bacia hidrográfica, foi criado um *shapefile* de pontos, para representação do exutório, e assim, inserido na ferramenta *r.water.outlet (GRASS)*, para delimitação da área de estudo. A Figura 8 demonstra o fluxograma do pré-processamento.

Figura 8. Fluxograma do pré-processamento



Fonte: Autor, 2025.

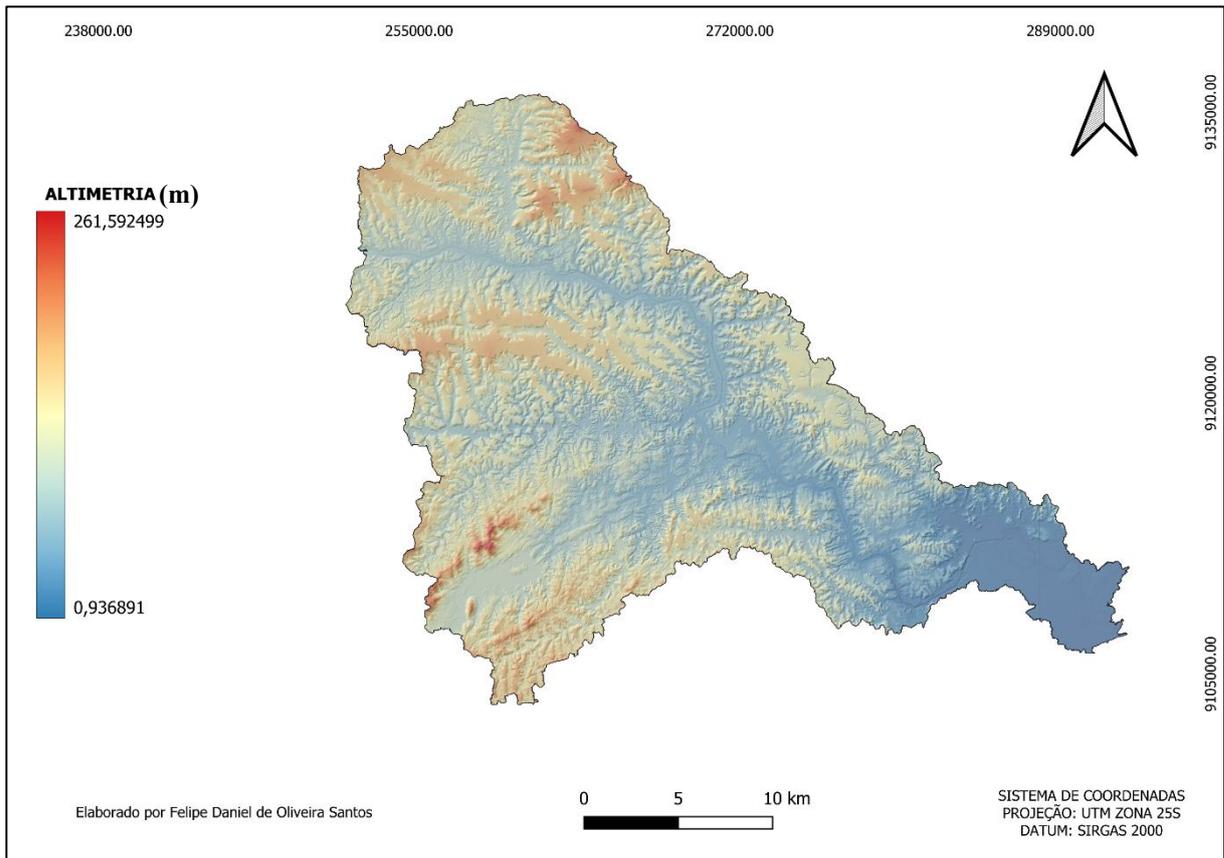
4.2. Preparação do banco de dados

Para a modelagem hidrológica, foi utilizado o modelo SWAT Plus. A plataforma requer a preparação de dados de entradas, que servem como alicerce para todo o processamento. Os dados necessários são o Modelo Digital do Terreno – MDT, Raster de uso e cobertura do solo e tipos de solo, ambos associados a suas respectivas tabelas de codificação e identificação, e dados climáticos.

4.2.1. Modelo Digital Do Terreno – MDT

O MDT foi obtido por meio da plataforma PE3D, como dito anteriormente. A altimetria da bacia é considerada baixa em relação a outras regiões da bacia do rio Capibaribe, apresentando características litorâneas e hipsométricas aproximadamente entre 0 e 262 metros, sendo a cidade de Recife com menor índice altimétrico, como descrito na Figura 9.

Figura 3. Mapa altimétrico da bacia hidrográfica delimitada.



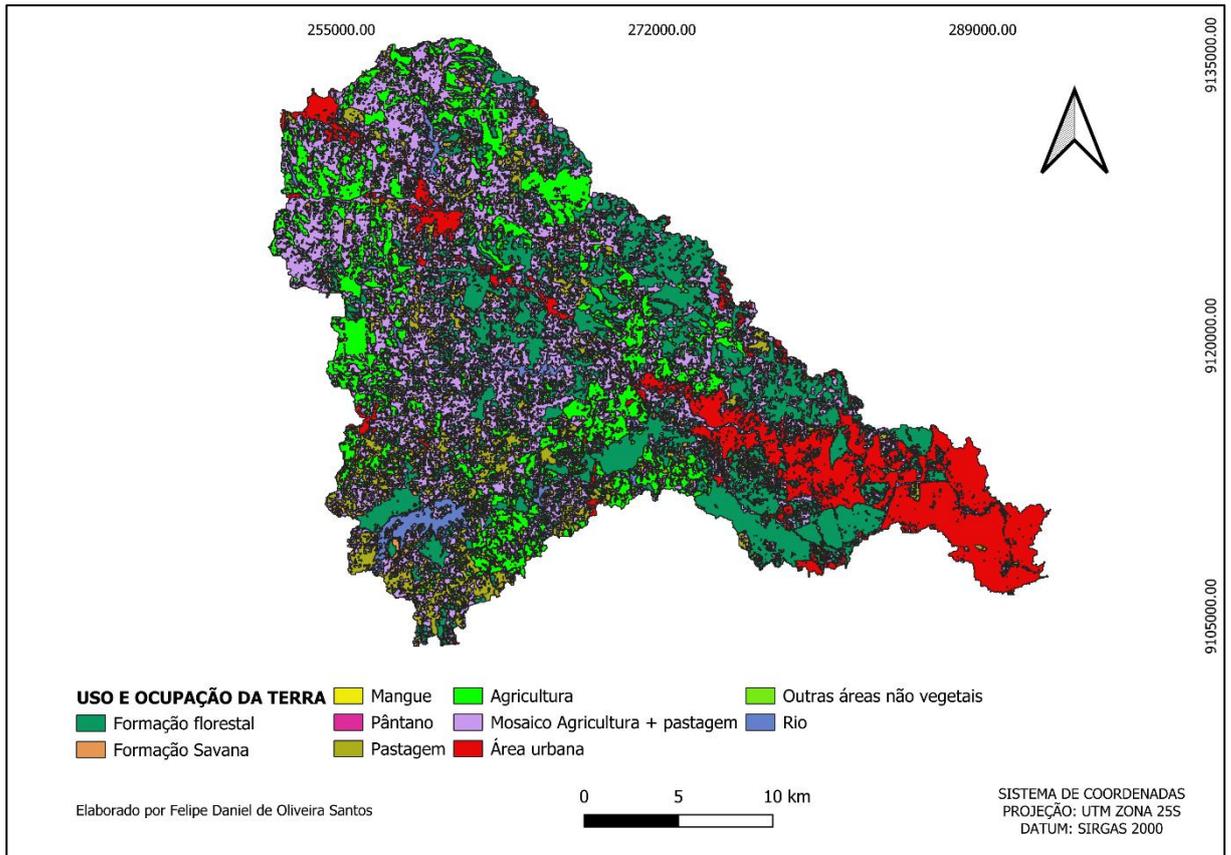
Fonte: Autor, 2025.

O pré-processamento do MDT seguido da metodologia descrita no item 4.2 foi posteriormente reprojetoado para o sistema de coordenadas SIRGAS 2000 UTM 25S.

4.2.2. Uso e cobertura do solo

A aquisição do dado de uso e cobertura da terra foi por meio do MapBiomias utilizando o programa *Google Earth Engine* – GEE, através da coleção *collection-2-10m-Beta* para o ano de 2023, sendo o ano mais recente trabalhado pela plataforma. A figura 9 demonstra a diversidade de uso e cobertura presente na área de estudo.

Figura 4. Mapa de uso e cobertura da bacia hidrográfica delimitada.



Fonte: Autor, 2025.

A distribuição dos tipos de uso e cobertura do solo na bacia é demonstrado por meio da tabela 1 a seguir, mostrando que áreas de formação florestal, Formação Savânica, Mangue e Pântano são os que apresentam maiores percentuais de áreas.

Tabela 1. Dados do uso e cobertura do solo e sua codificação

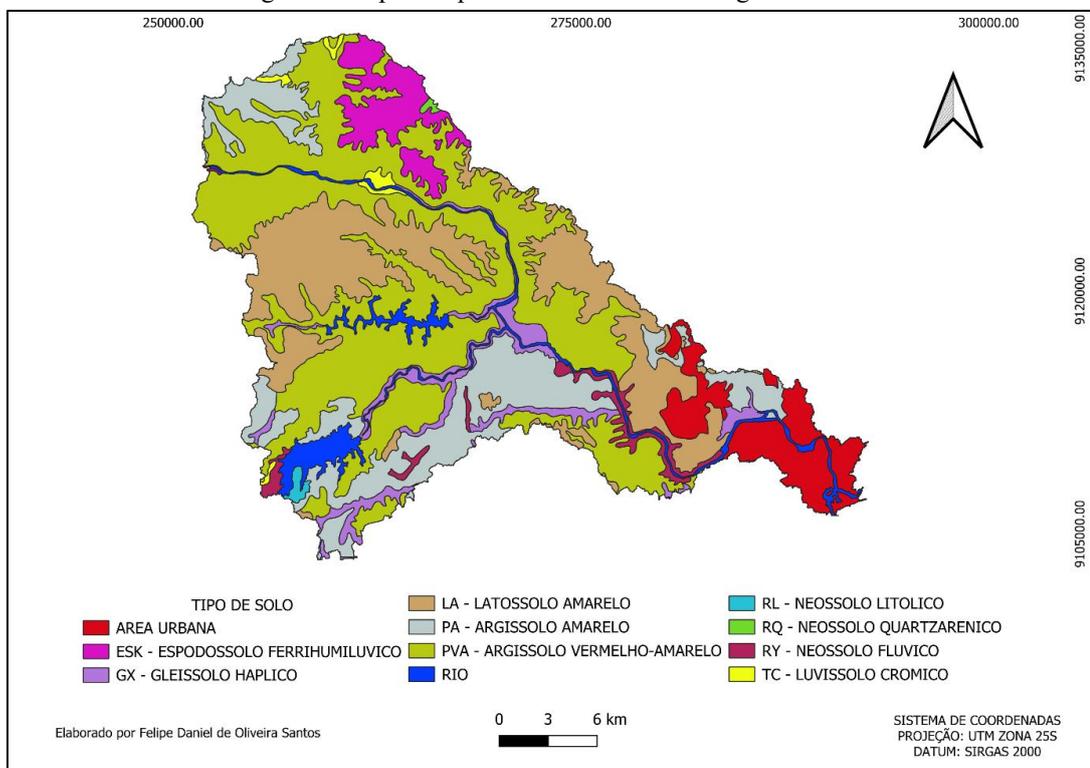
Código da Classe	Nome da classe - MapBiomas	Área (km ²)	Área (%)
3	Formação florestal	221,00	35,09
4	Formação savânica	139,21	22,10
5	Mangue	105,39	16,73
11	Pântano	80,34	12,75
15	Pastagem	67,48	10,71
19	Agricultura	12,04	1,91
21	Mosaico agricultura e pastagem	3,55	0,56
24	Área urbana	0,50	0,07
33	Rios	0,17	0,02
25	Outras áreas não vegetadas	0,07	0,01

Fonte: Autor, 2025.

4.2.3. Tipos de solos

O mapa com os tipos de solos foi obtido por meio da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), com dados disponibilizados do Zoneamento Agroecológico de Pernambuco (ZAPE), como demonstrado na Figura 10.

Figura 5. Mapa de tipos de solo da bacia hidrográfica delimitada.



Fonte: Autor, 2025.

Os solos com maiores presenças na bacia são dos tipos Argissolo Vermelho-Amarelo (40,46%), Latossolo Amarelo (20,50%) e Argissolo Amarelo (15,36%), como demonstrado por meio da Tabela 2.

Tabela 2. Dados do uso e cobertura do solo e sua codificação

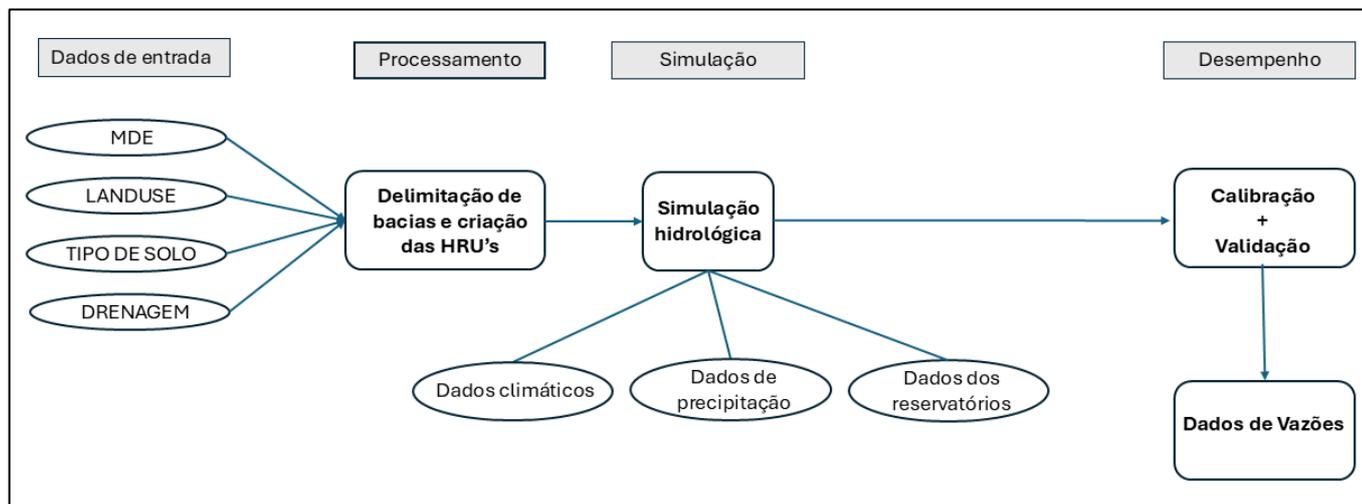
Classe Pedológica	Abreviatura	Área (ha)	Área (%)
Argissolo Vermelho - Amarelo	PVA	25.477,70	40,5
Latossolo Amarelo	LA	12.902,17	20,5
Argissolo Amarelo	PA	9.664,58	15,36
Área Urbana	AU	4.306,50	6,839
Gleissolo Haplico	GX	3.021,67	4,799
Espodossolo Ferrihumulvico	ESK	3.006,47	4,775
Rio	RIO	2.706,87	4,299
Neossolo Flúvico	RY	1.234,68	1,96
Luvissolo Cromico	TC	410,36	0,652
Neossolo Litolico	RL	175,27	0,278
Neossolo Quartzarenico	RQ	62,03	0,099

Fonte: Autor, 2025.

4.3. Etapas do SWAT

Para melhor demonstração das etapas realizadas no SWAT Plus para o processo de modelagem hidrológica, a figura 11 a seguir demonstra um fluxograma do processo, explicado nos índices 4.5.1 a 4.5.5.

Figura 6. Fluxograma das etapas do SWAT Plus.



Fonte: Autor, 2025.

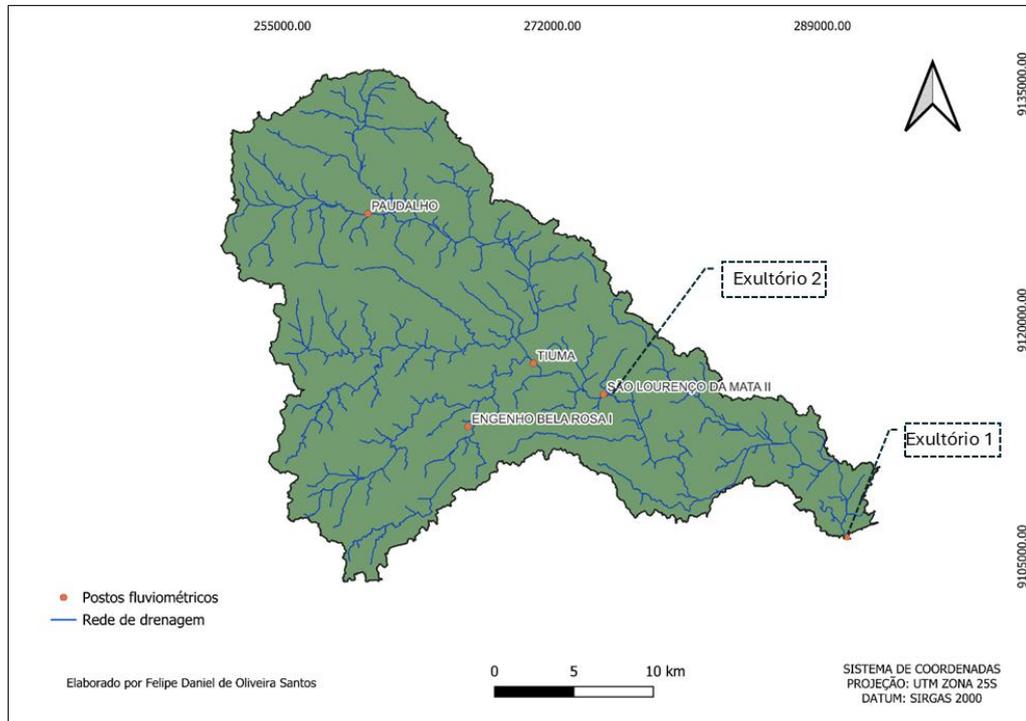
O processamento no SWAT se subdivide em quatro etapas, partindo dos dados de entradas (MDT, uso e cobertura da terra, tipos de solo, e drenagem), permitindo a delimitação das sub-bacias e criação das HRU's, e dessa forma, realizando a simulação hidrológica para extração de dados de vazões, que posteriormente foram calibrados e validados. As etapas da modelagem hidrológica no SWAT são descritas detalhadamente a seguir.

4.3.1. Discretização da bacia

A primeira etapa, nomeada como *Delineate Watershed*, consiste na criação da rede de drenagem e de sub-bacias da bacia. Para isso, é necessário a realização de dois passos, sendo o primeiro para a criação da rede de drenagem, tendo como dado de entrada é inserido o Modelo Digital do Terreno – MDT, e o segundo passo consiste se o usuário prefere adicionar um arquivo *Shapefile* já existente da rede de drenagem ou se quiser forçar o próprio programa a criar a rede de canais principais e suas ordens, adotando um parâmetro mínimo de densidade para acumulação de fluxo nos parâmetros *Channel Threshold* e *Streams Threshold*, que são utilizados para criação de áreas de influência onde os canais e rios de menores ordens serão criados. Para o presente trabalho, foi inserido um arquivo *shapefile* da rede de drenagem, realizado pelo programa QGIS.

Para criação das sub-bacias, foram adicionados dois pontos de exultórios, sendo um localizado no posto fluviométrico dentro da área de interesse e outro na foz do rio Capibaribe (Figura 12). Essa análise possibilita uma melhor modelagem da área de interesses nos pontos escolhidos (Farias, 2025). Foram também inseridos dois pontos de reservatórios, localizados mais a montante da área. Dessa forma, com a primeira etapa concluída, o programa gera a criação da delimitação da bacia hidrográfica e suas sub-bacias.

Figura 7. Localização dos pontos de exutórios para delimitação das sub bacias no SWAT.



Fonte: Autor, 2025.

4.3.2. Criação das HRU's

O modelo SWAT discretiza a bacia em sub-bacias e, posteriormente, em unidades menores denominadas Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's, do inglês Hydrological Response Units), parâmetro responsável por empilhar dados e convertendo-os para formato longo e unificando registros em uma única série (Farias, 2025). Para criação dessas HRU's, são necessários parâmetros de caracterização do uso e cobertura da terra, tipos de solos e da topografia da bacia.

Inicialmente foram inseridos os rasters de uso e cobertura da terra e tipos de solos da área de estudo e suas respectivas tabelas de atributos. As tabelas são inseridas para que o modelo entenda o significado de cada pixel do raster. A tabela de uso e cobertura do solo foi feita associando o ID de cada uso e cobertura com o código já existente no banco de dados do SWAT, sendo necessário a realização de manipulações de adequação, descritas posteriormente.

Algumas classificações sofreram alterações para que se enquadrassem no código tabelado do manual do SWAT. Dessa forma, “Formação florestal” passa a ser classificado como “Floresta Caatinga”, “Mangue” como “Áreas úmidas florestadas”, “Pântano” como “Áreas úmidas mistas”, “Mosaico de agricultura e pastagem” como “terras agrícolas irrigadas e pastagens”, e “Outras áreas não vegetadas” como vegetação escassa”, como descrito por meio da tabela 3.

Tabela 3. Dados do uso e cobertura do solo e sua codificação baseado no banco de dados do SWAT

Código da Classe	Nome da classe - MapBiomias	Classe uso e cobertura - SWAT	Abreviatura	Área (km²)	Área (%)
3	Formação florestal	Floresta Caatinga	FRST	221,00	35,09
4	Formação Savânica	Savana	SAVA	139,21	22,10
5	Mangue	Áreas úmidas florestadas	WETF	105,39	16,73
11	Pântano	Áreas úmidas mistas	WETL	80,34	12,75
15	Pastagem	Pastagem	PAST	67,48	10,71
19	Agricultura	Agricultura	AGRR	12,04	1,91
21	Mosaico agricultura e pastagem	Terras agrícolas irrigadas e pastagens	GRIR	3,55	0,56
24	Área urbana	Área urbana	URBN_COOL	0,50	0,07
33	Rios	Rios	WATR	0,17	0,02
25	Outras áreas não vegetadas	Vegetação escassa	BSVC	0,07	0,01

Fonte: Autor, 2025.

É importante ressaltar que essas mudanças na classificação do uso e cobertura do solo sejam realizadas com classificações e características semelhantes entre o MapBiomias e o SWAT. Com a inserção desses dados, a criação das HRU's demonstrou características hidrológicas semelhantes dentro de cada unidade e distintas entre unidades, ao agrupar áreas com uso do solo, tipo de solo e declividade semelhantes.

4.3.3. Entrada de dados climáticos e simulação

A simulação hidrológica foi realizada por meio da plataforma SWAT+ Editor, cuja operação exige, como informação essencial, as séries climáticas correspondentes à área em estudo. O software possibilita ao usuário duas opções de entrada, a primeira consiste no uso de dados observacionais, normalmente disponibilizados por órgãos oficiais, como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e a segunda baseia-se no gerador climático interno do SWAT, fundamentado no banco de dados *global Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR).

Neste trabalho, optou-se pela utilização dos dados globais do CFSR, tendo em vista sua abrangência espacial, a continuidade temporal a partir de 1979 e a consistência das séries, fatores que conferem maior padronização ao processo de simulação. Essa etapa se subdivide em dois momentos: o primeiro, denominado *Weather Generator*, referindo-se à inserção dos parâmetros globais do CFSR e o segundo, *Weather Stations*, que corresponde à incorporação de dados provenientes de estações meteorológicas locais.

Para complementar, foram selecionadas quatro estações pluviométricas, submetidas a uma avaliação criteriosa, verificando os dias em que não houve registros e substituindo-os pelo valor -99 e, em seguida, corrigidos pelo gerador climático do SWAT quanto à extensão das séries e aos próprios dados presentes. O período analisado compreende a utilização de dados entre os anos de 1990 e 2025, extraídos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Ambiental - ANA. As estações efetivamente utilizadas encontram-se listadas na Tabela 4, que apresenta os pontos adotados como entrada no modelo.

Tabela 4. Dados dos postos pluviométricos inseridos no SWAT Editor.

Código	Nome da estação	Latitude	Longitude	Elevação (m)
735157	Carpina	-7,8428	-35,1825	116
735066	Paudalho	-7,8942	-35,1733	82
735050	Engenho Sítio	-7,9681	-35,1567	65
835048	São Lourenço da Mata II	-7,9986	-36,0469	738

Fonte: Autor, 2025.

Para realização da simulação hidrológica, foi trabalhado um intervalo de tempo entre 1990 e 2025, com processamento de dados mensais. De antemão, houve a cogitação de se trabalhar com dados diários, porém por motivos de processamento e limitação da máquina utilizada, optou-se pela simulação mensal dos dados. Após a realização da simulação hidrológica, utilizou-se o SWAT ToolBox, para verificação do desempenho do modelo.

4.3.4. Análise do desempenho do SWAT + na simulação das vazões

Para analisar a qualidade dos dados hidrológicos gerados, o SWAT ToolBox gera gráficos e tabelas de dados observados do posto fluviométrico trabalhado e dados simulados. A

comparação foi realizada utilizando análises estatísticas como o KGE, RMSE, MARE, PBIAS, NSE e R^2 , que são análises fornecidas pelo próprio SWAT. A análise foi realizada considerando os critérios de desempenho estabelecidos por Moriasi et al. 2015.

Tabela 5. Análise da qualidade do modelo

Parâmetro	Muito bom	Bom	Satisfatório
R^2	>0,85	>0,75	>0,65
NSE	>0,80	>0,70	>0,50
PBIAS	<3,0	3,0<PBIAS<10,0	10,0<PBIAS<15,0
Correlação (r)	>0,92	>0,87	>0,81

Fonte: Adaptado de Moriasi et al. (2015).

Valores de PBIAS positivos indicam que o modelo subestima os valores simulados em relação aos observados, enquanto valores negativos indicam superestimação (Moriasi et al., 2007; Moriasi et al., 2015). O Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) avalia se a simulação supera o uso da média dos dados observados e varia de $-\infty$ a 1, com valores próximos de 1 indicando alta aderência entre as séries (Nash e Sutcliffe, 1970). Já o Kling–Gupta Efficiency (KGE) quantifica a semelhança considerando correlação, viés e variabilidade, também variando de $-\infty$ a 1, em que 1 representa ajuste perfeito (Gupta et al., 2009; Kling, Fuchs & Paulin, 2012; Knoben, Freer & Woods, 2019).

4.3.5. Calibração e validação

A definição dos parâmetros utilizados na calibração no posto fluviométrico trabalhado foi realizada por meio de uma análise de sensibilidade, cuja finalidade é identificar quais parâmetros exercem maiores influências sobre os resultados do modelo quando ajustados. Os parâmetros foram atribuídos conforme as sugestões do próprio SWAT, conforme apresentado na Tabela 6 abaixo. O SWAT, no processo de calibração e validação, subdivide a rede de drenagem em pequenas porções, e permite de forma seletiva a escolha em qual(s) trechos o usuário pretende realizar a modificação dos parâmetros de sensibilidade no processo de calibração. Neste trabalho, optou-se por aplicar as modificações ao trecho urbano do Rio Capibaribe, localizado na área de trabalho de interesse.

Tabela 6. Definição dos parâmetros e limites utilizados na calibração do modelo.

Parâmetro	Descrição	Mínimo	Máximo
cn2	Número da Curva de Escoamento (Curve Number – infiltração e escoamento)	-20	20
esco	Fator de compensação de armazenamento de água no solo	0	1
epco	Fator de compensação de extração de água pelas plantas	0	1
canmx	Armazenamento máximo de água no dossel	1	100
perco	Coefficiente de percolação	0	1
lat_ttime	Tempo de resposta do fluxo lateral	-10	20
cn3_swf	Fator de ajuste do CN3	0	1
alpha	Fator de recarga baseflow	0,01	0,9
flo_min	Vazão mínima para escoamento subterrâneo	0	20
revap_co	Coefficiente de revaporação	0,02	0,2
revap_min	Profundidade mínima para revaporação	0	50
bf_max	Fração máxima de contribuição do aquífero para baseflow	0,1	2
awc	Capacidade de água disponível no solo	-10	10
k	Condutividade hidráulica saturada	-10	20
chk	Coefficiente de rugosidade de Manning no canal	-20	20

Fonte: Manual do SWAT, ajustado pelo autor, 2025.

O processo de calibração foi realizado dividindo o intervalo de anos com dados observados de vazões (1990 – 2025) em 3, sendo 3 anos para aquecimento do modelo (1987 – 1989), 20 anos de calibração (1990 – 2009) e 16 anos de validação (2010 – 2025). Após a calibração realizada pelo software, os parâmetros e seus valores atribuídos pela calibração automática são levados para o SWAT editor, onde o modelo é simulado para futura extração dos dados de vazões de saída com modelo calibrado. Assim como para o período de validação, onde o modelo novamente é executado para extração de dados de vazões.

Pós o processo de calibração e validação, as saídas dos dados foram levadas para o Excel, para realização de cálculos estatísticos para determinar o desempenho do modelo executado.

Vale-se salientar que a calibração e validação do SWAT é aplicada para toda área da bacia trabalhada no fim do processo. Ao inserir os dados de vazões no SWAT referentes a pontos de monitoramento fluviométricos dentro da bacia, o programa considera o processo de calibração para toda a área ou para alguma bacia em específico (opcional), ou seja, o cálculo da análise estatística entre dados simulados e observados pode ser válido para todos os canais que preenchem a bacia. Para o presente estudo, a análise de desempenho levou em consideração os dados simulados em um trecho urbano do rio Capibaribe, localizado na cidade de Recife - PE. O canal escolhido vai ser utilizado na modelagem hidrodinâmica para simulação de mancha de inundações, tendo como dados de entrada as vazões simuladas desse trecho.

4.4. ENTRADA DE DADOS NO HEC-RAS

O modelo HEC-RAS foi utilizado para a geração de mancha de inundações na cidade de Recife - PE, por meio do regime não permanente. A aplicação dessa plataforma justifica-se por ser amplamente adotada pela comunidade científica e acadêmica em estudos hidrológicos e hidráulicos, o que confere uma maior confiabilidade às análises de cheias em rios. No contexto de Recife, sua utilização torna-se ainda mais relevante devido à ocorrência recorrente de eventos hidrológicos extremos, com cargas históricas, que têm impactado a cidade e sociedade local com processos de inundações e alagamentos.

4.4.1. Área de estudo da modelagem hidrodinâmica

A região escolhida para a realização da análise de mancha de inundações fica localizado em um trecho urbano do rio Capibaribe, na cidade de Recife – PE. O trecho tem uma extensão total de 8,5 km, abrangendo os bairros São José, Santo Antônio, Coelhos, Ilha Joana Bezerra, Ilha do Leite, Paissandu, Ilha do Retiro, Madalena, Derby, Graças, Torre e Jaqueira. O trecho encontra-se entre as coordenadas UTM Norte 9111090,875 - Leste 289687,801 e Norte 9107949,069 e Leste 293329,708. A Figura 13 a seguir ilustra com mais detalhes a localização do trecho para realização da modelagem hidrodinâmica.

Figura 8. Mapa de localização do trecho escolhido para modelagem hidrodinâmica.



Fonte: Autor, 2025.

A escolha do trecho escolhido para estudo de cheias levou em consideração a presença de uma alta densidade urbana e por apresentar baixos índices de vegetação no entorno do rio, assim como eventos recentes que causaram grandes impactos socioeconômicos nesta parte do rio Capibaribe, em decorrência de eventos como inundações e alagamentos.

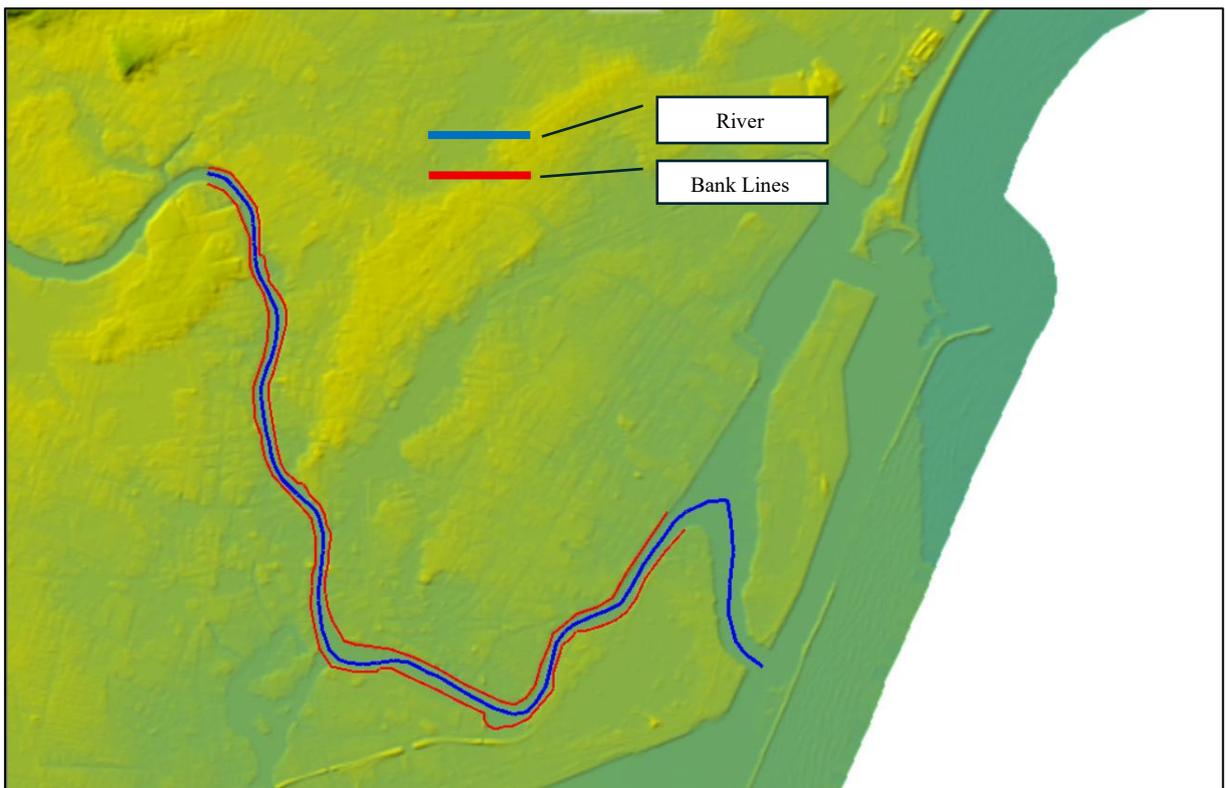
4.4.2. Regime não permanente

A utilização do regime não permanente no HEC-RAS requer como dados de entrada as vazões do trecho trabalhado, o modelo digital do terreno e o Manning do canal do rio no SIG interno do software chamado *RasMapper*. Inicialmente é necessário estabelecer um sistema

unidades e de referências ao programa, que fora o sistema métrico e utilização do SIRGAS 2000, 25 S, arquivos baixados do Spatial Reference, 2025.

A próxima etapa é a inserção do modelo Digital do Terreno e delimitação do canal. O MDT é inserido no programa, fazendo com que crie o parâmetro “Terrain”. A delimitação do canal é realizada inicialmente criando uma feição para o rio (trecho), chamado de *Rivers*, e a delimitação dos *Bank Lines*, geometria responsável por delimitar a mudança de *manning* entre a região interna e externa dele (calha). A calha foi delimitada seguindo o modelo digital do terreno e por meio do imageamento de satélite, em decorrência dos taludes apresentarem em toda sua extensão a presença de vegetação e concreto, e por último são delimitadas áreas por onde o escoamento poderia transbordar, este sendo referenciado por meio das diferenças de altitudes. A Figura 14 representa a delimitação da calha.

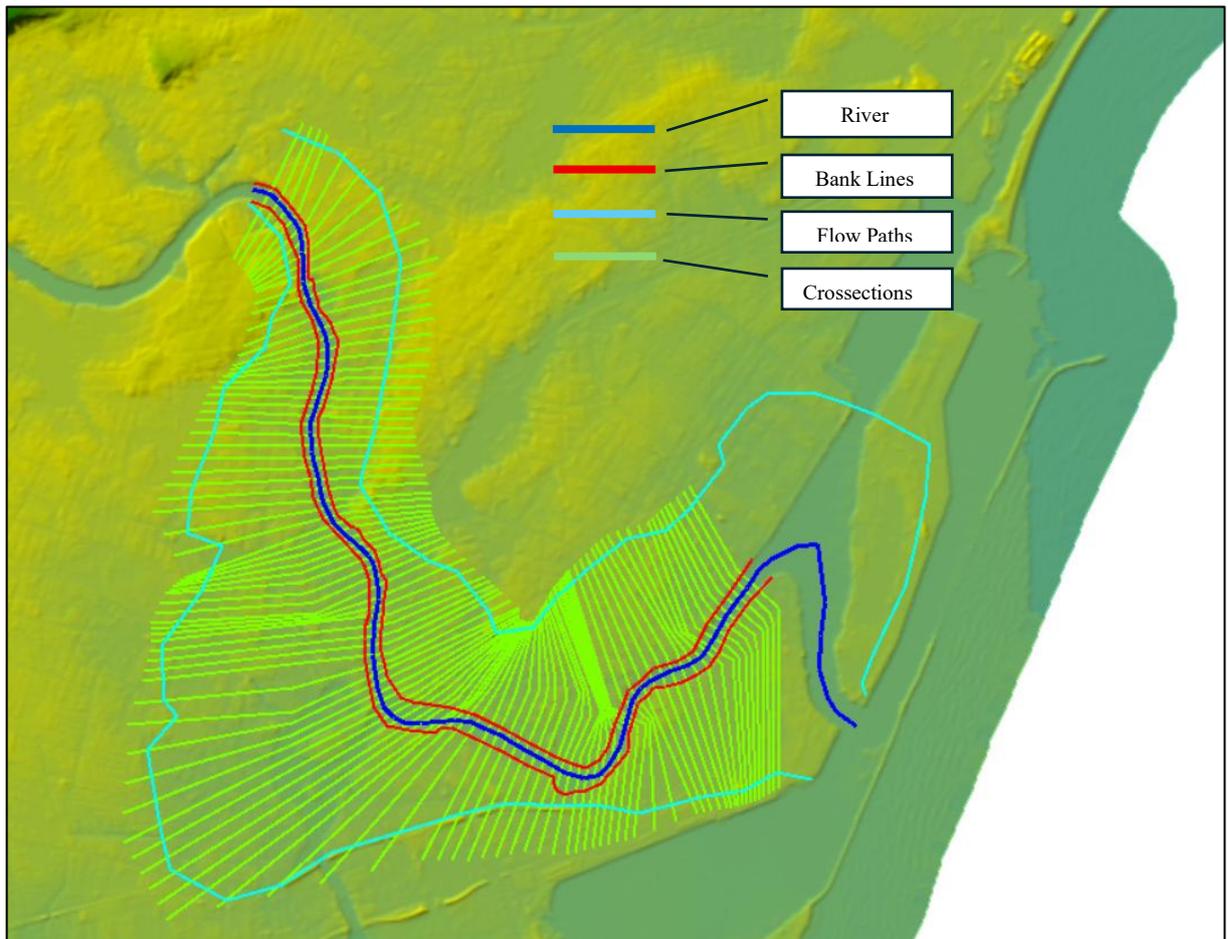
Figura 9. Delimitação da calha e do canal principal do rio na geometria do RasMapper.



Fonte: Autor, 2025.

Para completar a etapa de geometria, após a delimitação dos *Bank Lines* (linhas de margem), *Rivers* (rios) e *Flow Paths* (linhas de escoamento), são inseridos os *crosssections* (seções transversais). Para isso, são traçados linhas contínuas e perpendiculares aos *Bank Lines*, buscando analisar em termos expansivos o quanto cada seção do rio, baseado em seus parâmetros (Manning e elevação), contribui para o fluxo de água em planícies de inundação. A Figura 15 a seguir demonstra a delimitação de todos os parâmetros geométricos supracitados.

Figura 10. Delimitação dos Ban Lines, Rivers, Flow Path e Crosssections no RasMapper.



Fonte: Autor, 2025.

As seções transversais (*crosssections*) foram traçadas de modo a interceptar todas as geometrias relevantes (canal e planície de inundação), com maior adensamento nos trechos mais curvilíneos do rio. Em seguida, aplicou-se a ferramenta “*XS Interpolation by Reach*” para interpolar as seções, fixando espaçamento de 45 m entre transectos, o que resultou em 102 seções. Esse espaçamento foi definido de forma criteriosa, pois quanto menor a distância

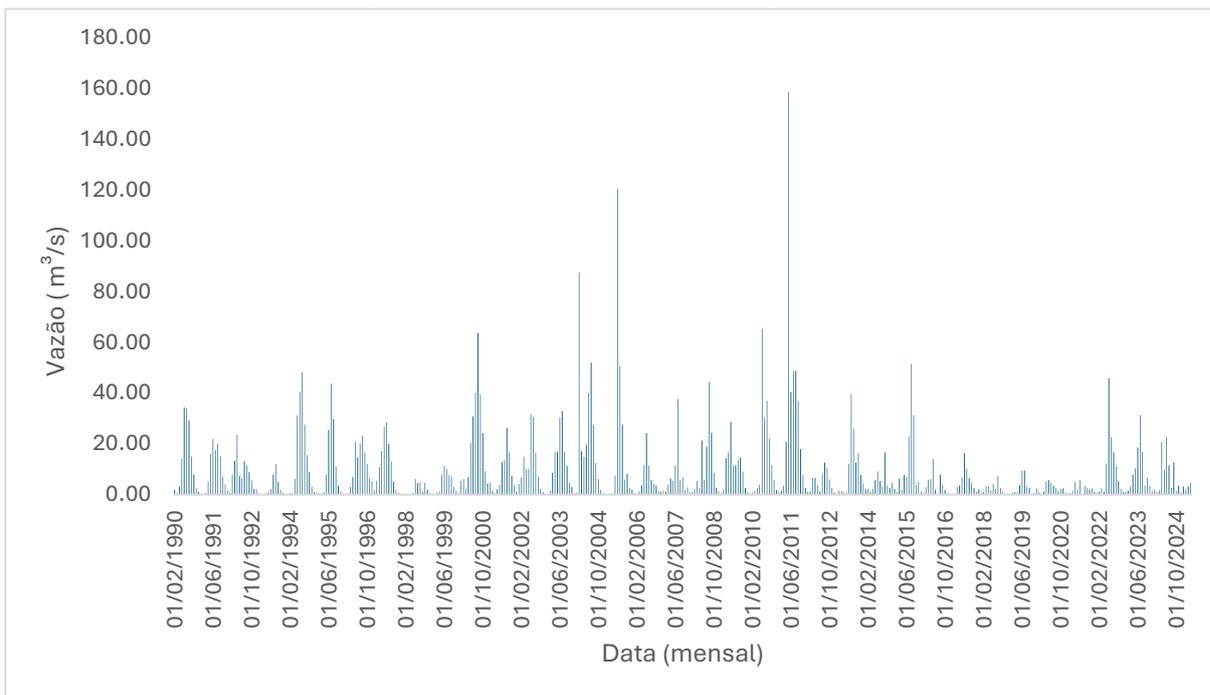
adotada na interpolação, maior o risco de interseções indesejadas entre as seções transversais e, consequentemente, de erros no processamento posterior.

É importante ressaltar que, na porção sul, a mancha de inundação apresentou expansão limitada em função das restrições inerentes ao modelo unidimensional. A aplicação de *cross sections* encontra dificuldades em trechos com curvas muito acentuadas, uma vez que compromete o posicionamento adequado das seções transversais, que idealmente devem ser perpendiculares ao fluxo (*flow paths* e *rivers*). Diante dessa limitação geométrica, optou-se por delimitar o trecho modelado até a região anterior ao ponto de inflexão da curva, garantindo maior consistência aos resultados e simplificando o processamento.

Para realização da mancha de inundação, é requerido na aba “Manning’s n or k values” os dados dos Valores de Manning do canal. Para isso, foram inseridos 3 valores diferentes de Manning, 2 deles seguindo as sugestões do próprio manual do HEC-RAS e 1 deles seguindo a metodologia do trabalho de Chow, 1988. Para o Manning do rio, foi estabelecido o valor de 0,055, intitulado como “Main Channel”, para calha do rio nos trechos constituídos de canal. Para a calha do rio foi utilizado o Manning de 0,11 para vegetação pouco densa e 0,2 para alta densidade. Para regiões onde a calha era formada de concreto, foi atribuído um valor de 0,02.

Depois da realização da geometria e valores de Manning, foi escolhido o regime não permanente, condições variando ao longo do tempo, em “View/Edit unsteady flow data”. Para esse regime o HEC-RAS exige uma série temporal de vazões. Os dados utilizados foram as vazões simuladas resultantes da modelagem hidrológica do SWAT +, tendo como intervalo de dados mensais compreendidos entre os anos de 1990 e 2025 e posteriormente analisado e computado 3 intervalos temporais que tivessem maiores picos de vazão para análise de cheia. A Figura 16 a seguir mostra o comportamento fluviométrico utilizado como dado de entrada na modelagem hidrodinâmica.

Figura 11. Vazões utilizadas na modelagem hidrodinâmica.



Fonte: Autor, 2025.

O programa exige que sejam atribuídos condições de contorno no começo e no final do trecho. Para condição de contorno a montante, foram inseridos intervalos de dados intervalos de vazões da série demonstrada na Figura 16, e como condição jusante o valor de declividade de fricção, intitulado como “Normal Depth”. Pela ausência de dados para realização de seu cálculo, foi levado em consideração o cálculo da divisão das cotas a montante e jusante do canal e sua extensão, representando a declividade do fundo do canal, resultando em um valor de 0,000075. Posteriormente foi estabelecido as condições iniciais da simulação, atribuindo o valor inicial de vazão na série temporal.

Para o presente trabalho, foram escolhidos três intervalos, sendo dois intervalos temporais (2003 – 2006 e 2010-2013) com maiores picos de vazões, 1 intervalo de dados de vazões para períodos mais recentes (2021-2025). A ferramenta disponibiliza a escolha do intervalo de computação, a cada 4 horas e como saídas foi estabelecido a geração de mancha de inundações diárias.

Também foram calculado três cenários hipotéticos correspondente aos três intervalos de anos, substituindo a distribuição do *Manning* para uma forma contínua e homogênea representando o impacto da presença de vegetação densa em todo o entorno do rio e como essa

aplicação reduz os impactos causados na sociedade e infraestrutura instalada no entorno do rio. Para isso, foi atribuído um valor de 0,2 para ambos os lados das calhas. Para a computação, foi utilizado os mesmos valores de intervalos de vazões, e por fim, a análise buscou verificar e comparar a quantificação da mancha de inundação e dos gráficos de profundidade e velocidade do cenário real e hipotético.

Para uma análise dos impactos da mancha de inundação, foi destacado a quantificação da área da mancha de inundação na área urbana no entorno do rio. Dentre todos os anos analisados, as maiores vazões simuladas encontram-se, entre os anos de 2010 e 2013, sendo o ano de 2011 no mês de junho com maior valor de vazão. Foi possível exportar a mancha de inundação deste ano em específico, e transformá-la em um SIG em polígono para verificação de quais bairros foram mais impactados. O shapefile dos bairros de Recife foi obtido por meio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, e interseccionados pela mancha de inundação, obtendo-se assim as áreas ocupadas pela mancha de inundação para cada bairro atingido, e conseqüente sua porcentagem ocupada. Essa aplicação foi feita comparando o percentual de cada bairro afetado pela mancha, e verificando quais bairros estão frequentemente mais expostos a inundações.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O trabalho desenvolvido integrou técnicas de modelagem hidrológica e hidrodinâmica com o objetivo de compreender o comportamento de cheias em uma área urbana na cidade de Recife - PE. Inicialmente, recorreu-se ao modelo hidrológico SWAT para gerar séries de vazões simuladas a partir de informações climáticas, de solo e de uso e cobertura da terra, assegurando a representação espacial e temporal dos processos hidrológicos. Esses resultados serviram de base para a etapa seguinte, em que se empregou um modelo hidrodinâmico para avaliar a propagação do escoamento ao longo do curso d'água. Para isso, combinaram-se as séries de vazões simuladas com dados de topografia derivados de um modelo digital do terreno de alta resolução (LiDAR) e com parâmetros hidráulicos, como o coeficiente de Manning. A partir dessa integração, foi possível obter mancha de inundação representativas de diferentes

intervalos temporais, contribuindo para a análise de riscos e para o planejamento territorial da região estudada.

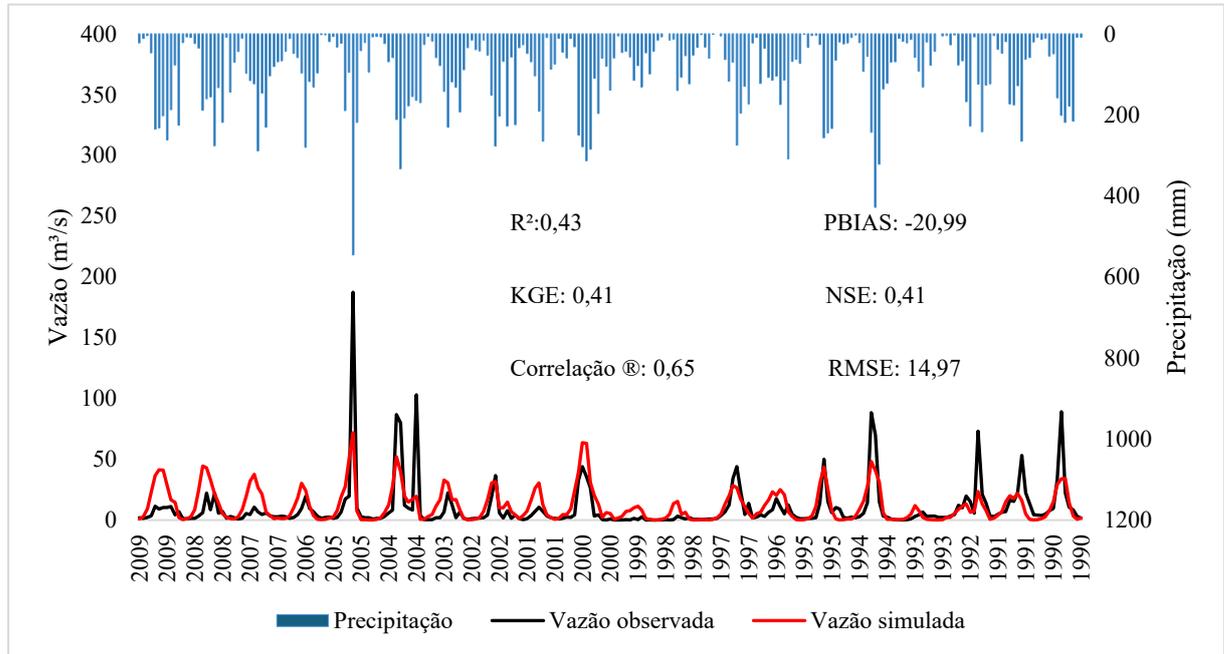
5.1. Modelagem Hidrológica

O modelo SWAT foi utilizado no trabalho para a realização de uma modelagem hidrológica em uma bacia delimitada a jusante da bacia do rio Capibaribe. Inicialmente houve a apresentação dos valores de vazões simuladas sem a atribuição de parâmetros calibração, e posteriormente o modelo foi preenchido por parâmetros para análise de sensibilidade e, por conseguinte calibrado e validado para análise de desempenho do modelo trabalhado.

A modelagem inicia-se quando é inserido o modelo digital do terreno (MDT), no qual a característica altimétrica da área de estudo apresenta altitudes variando entre 0 e 262 metros, com ondulações de declividade entre 3-8% e 8-20%. Foram criadas 150 HRU's, unidades básicas do próprio SWAT, resultante da interseção de uso e cobertura da terra, tipo de solo e classe de declividade dentro sub-bacias, e 14 sub bacias.

A simulação hidrológica trabalhou com um intervalo de dados mensais de 30 anos, considerando o posto fluviométrico de São Lourenço da Mata, local onde foram capturados dados de vazões e precipitação. O processo de simulação e do modelo acontece no SWAT Editor, e o processo de calibração do modelo é no SWAT ToolBox. A Figura 17 a seguir refere-se aos dados de vazões antes da calibração, com seus respectivos dados estatísticos.

Figura 12. Comportamento da comparação da vazão simulada pelo modelo hidrológico com vazão observada, antes da calibração.



Fonte: Autor, 2025.

O hidrograma aponta desempenho abaixo do desejável na fase inicial para o posto, embora o modelo acompanhe o regime hidrológico e posicione os picos em consonância com a precipitação, as vazões simuladas estão subestimadas, indicando a necessidade de ajustar os parâmetros. Vê-se que a relação entre vazões simuladas e observadas apresenta um quadro insatisfatório ($PBIAS = -20,99\%$, $NSE = 0,41$, $KGE = 0,41$, $R^2 = 0,43$ e $RMSE = 14,97$), que evidenciam viés negativo e aderência entre os dados apenas moderada. Assim, faz-se necessário a calibração dirigida para aumentar a resposta aos eventos de chuva e reduzir a atenuação dos picos, com ajuste de parâmetros adotados no modelo de calibração.

5.1.1. Calibração e validação do modelo hidrológico

A seleção de parâmetros para calibração é obtida com os melhores parâmetros para o cálculo das estatísticas. Muitas literaturas abordam aqueles que apresentam maiores impactos

na análise de sensibilidade. Para o presente trabalho, optou-se pela utilização de todos os parâmetros sugeridos pelo SWAT, demonstrados na tabela 7 a seguir.

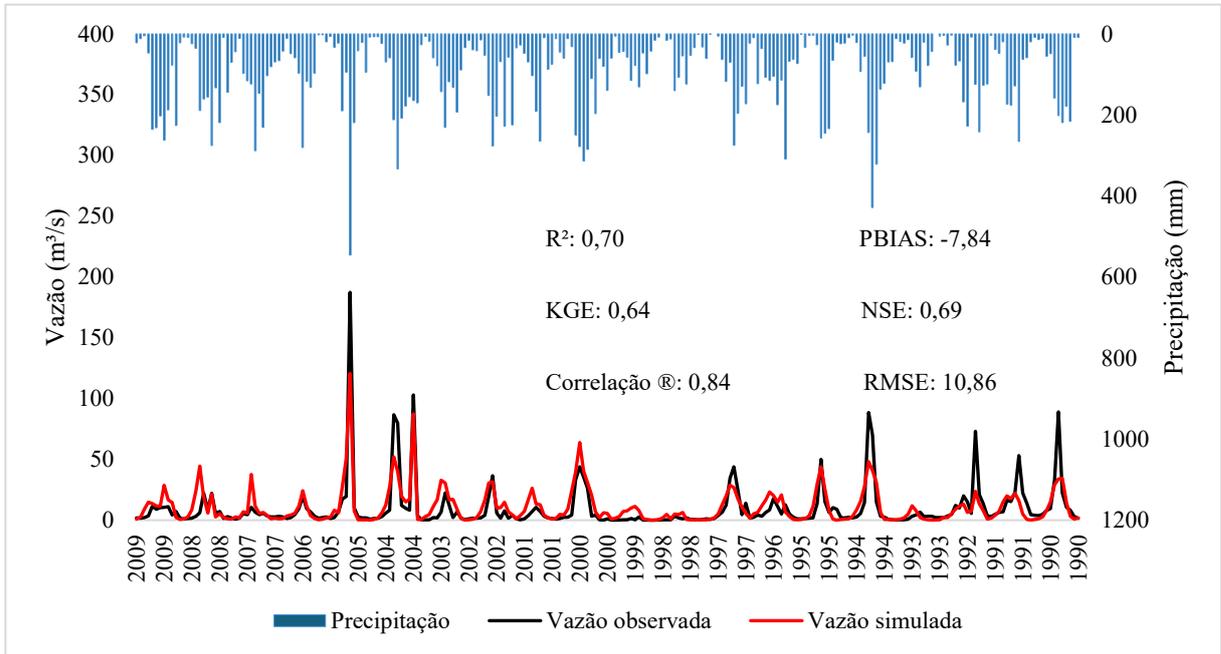
Tabela 7. Valores resultantes dos parâmetros calibrados automaticamente pelo SWAT ToolBox.

Name	Value
cn2	-20.000
esco	0.903
epco	0.598
canmx	7.968
perco	0.000
lat_ttime	20.000
cn3_swf	0.536
alpha	0.078
flo_min	20.000
revap_co	0.132
revap_min	33.833
bf_max	1.868
awc	-5.328
k	-2.216
chk	-14.786

Fonte: Autor, 2025.

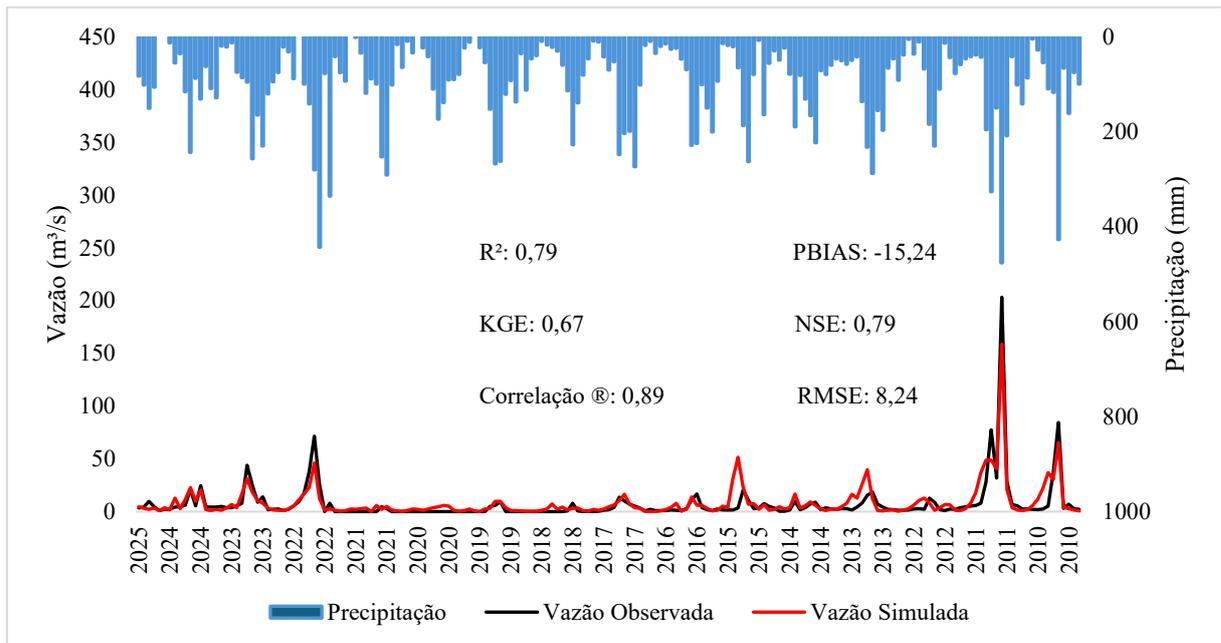
O resultado da calibração e validação são apresentados nas Figuras 18 e 19 e Tabela 8 a seguir.

Figura 13. Comportamento mensal do Hidrograma e hietograma antes da calibração.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 14. Hidrograma e hietograma das vazões observadas e validadas e da precipitação média mensal de 2010 a 2025.



Fonte: Autor, 2025.

Tabela 8. Análise estatística do modelo para o posto

Parâmetro	Vazão observada	Vazão calibrada (1990 - 2010)	Vazão validada (2010 - 2025)
R ²	0,43	0,70	0,79
NSE	0,41	0,69	0,79
PBIAS	-20,99	-7,84	-15,24
RMSE	14,97	10,86	8,24
Correlação	0,65	0,84	0,89
KGE	0,41	0,64	0,67

Fonte: Autor, 2025.

Verificou-se que os dados observados e simulados após a calibração e validação foram relativamente boas, seguindo a metodologia de Moriasi et al. (2015). Os hidrogramas após a calibração mostram claro ganho de desempenho, com menor suavização e melhor alinhamento temporal com a precipitação. No período calibrado, os índices (NSE = 0,69; KGE = 0,64; R² = 0,70) indicam bom ajuste para a escala mensal, com PBIAS = -7,84% e RMSE = 10,86 em níveis aceitáveis. Na validação, os resultados estatísticos permanecem satisfatórias (NSE = 0,79; KGE = 0,67; R² = 0,79), com RMSE = 8,24. O aumento do PBIAS para -15,24% sugere subestimativa das vazões simuladas. As recessões estão consistentes, mas podem ganhar melhores desempenhos com ajustes finos nos parâmetros estabelecidos no processo de calibração.

O modelo mostrou-se apto para aplicações mensais e estudos de cenários, com bons índices estatísticos na análise de simulação de vazões para qualquer canal presente na bacia hidrográfica, principalmente em áreas que não apresentam ou carecem de dados fluviométricos, como é o caso da cidade de Recife. Dessa forma, vê-se que as vazões simuladas após o processo de calibração estão aptas na aplicação de estudos de cheias na área de estudo em modelos hidrodinâmicos.

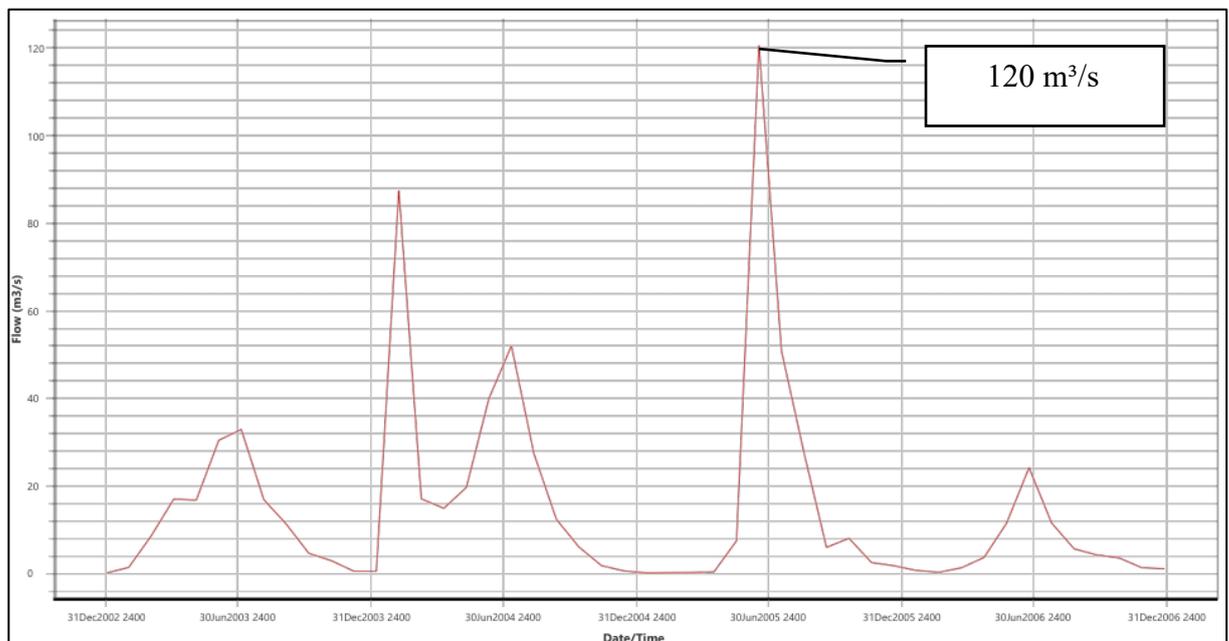
5.2. Modelagem hidrodinâmica

5.2.1. Mancha de inundação

Foram conduzidas seis simulações no total, distribuídas em três cenários considerados reais, nos quais se aplicou o coeficiente de *Manning* correspondente à calha do rio, e um cenário hipotético, onde os valores de *Manning* foram ajustados de forma distinta aplicados a três intervalos temporais distintos. A comparação entre os resultados ocorreu a partir da análise das diferenças observadas nas variáveis de profundidade e velocidade do escoamento entre os cenários reais e os cenários simulados com valores alternativos de rugosidade (hipotéticos).

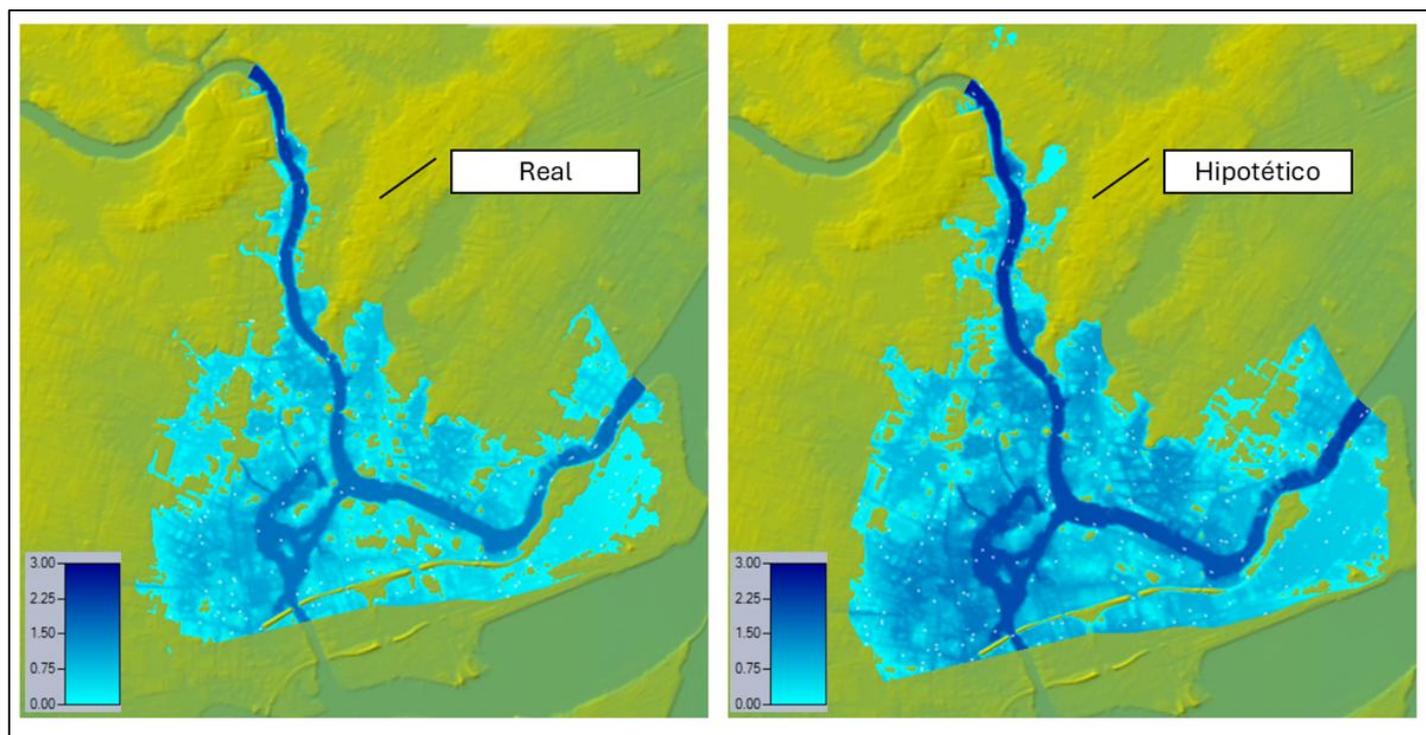
A primeira análise corresponde ao intervalo entre os anos de 2003 e 2006, onde apresenta como maior pico de vazão um valor de 120,0 m³/s, demonstrado por meio da Figura 20 a seguir. A comparação entre resultados foi demonstrada por meio do comportamento da mancha no maior valor de pico de vazão. O comportamento deste valor de vazão na computação hidrodinâmica tem como resultado a mancha de inundação e a velocidade do escoamento entre os cenários, demonstrados pelas Figuras 21, 22, 23, 24 e 25.

Figura 15. Hidrograma entre os anos 2003 e 2006.



Fonte: Autor, 2025.

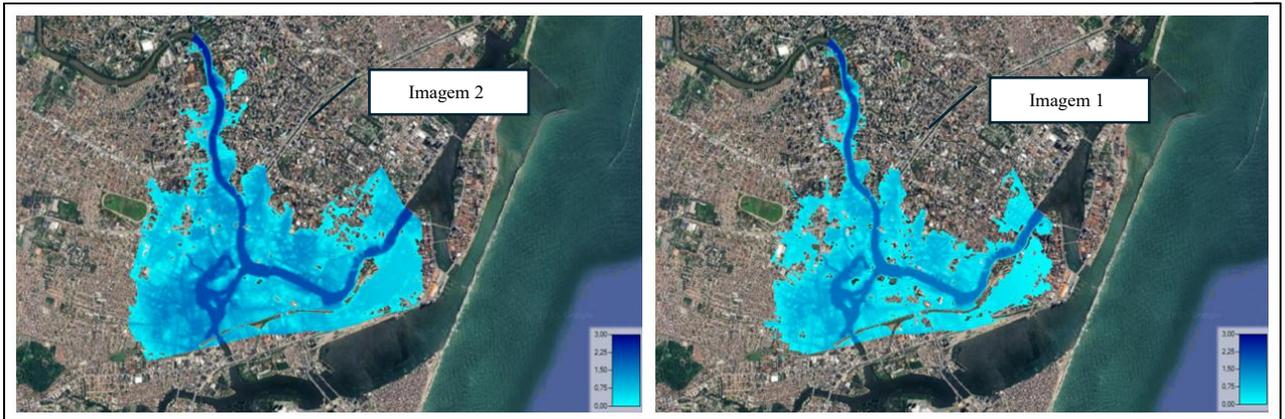
Figura 16. Comparação da mancha de inundação entre cenários ocasionado pela vazão de pico no intervalo entre 2003 e 2006.



Fonte: Autor, 2025.

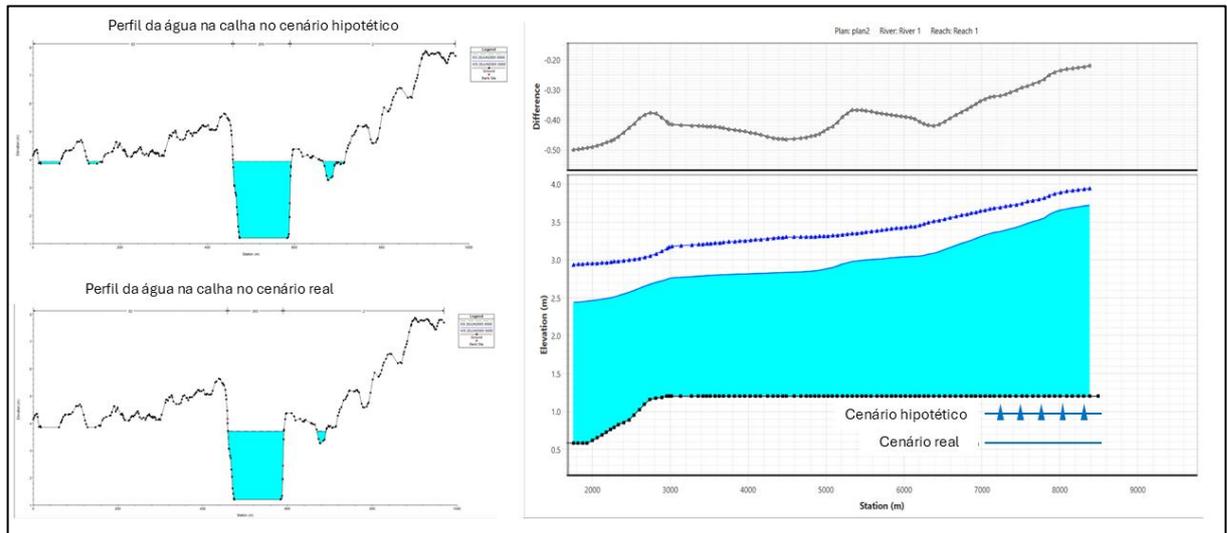
Para uma melhor demonstração do espalhamento da mancha de inundação nas áreas urbanas, o HEC-RAS permite uma visualização detalhada por meio do imageamento de satélite (Figura 22).

Figura 17. Comparação do espalhamento da mancha de inundação para o cenário real (imagem 1) e hipotético (imagem 2).



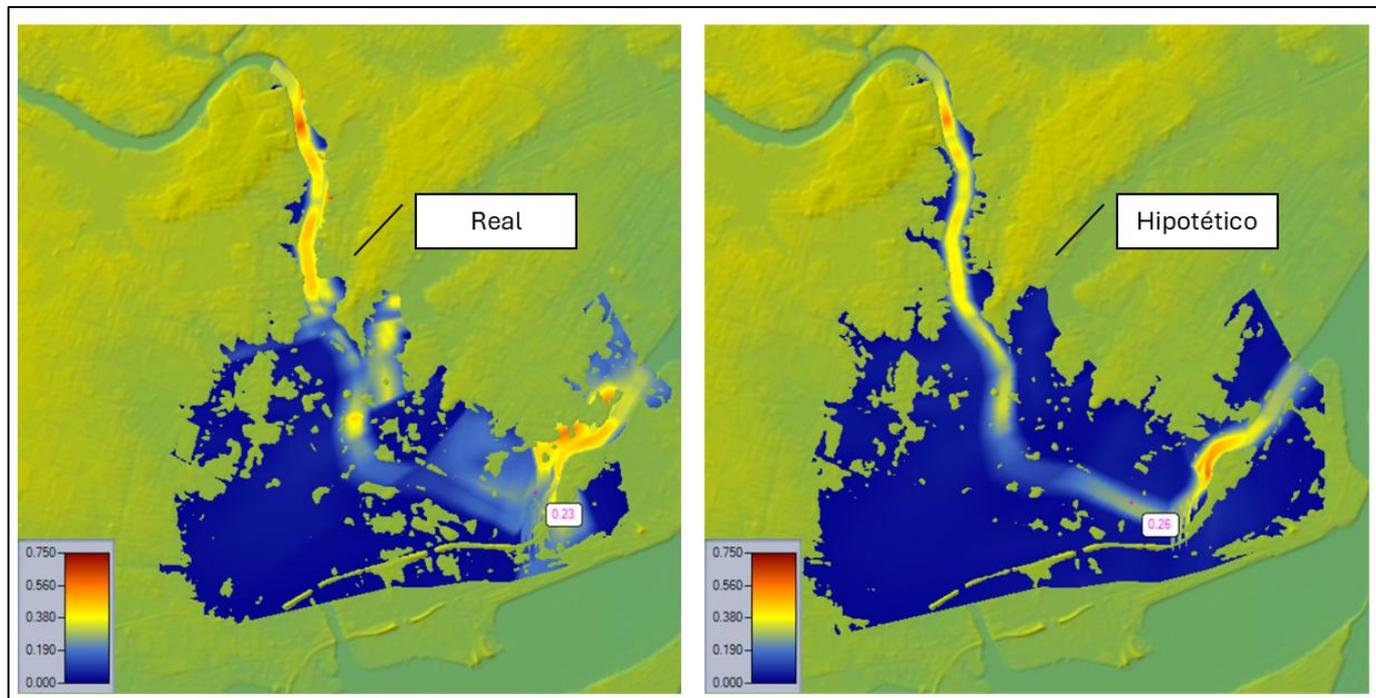
Fonte: Autor, 2025.

Figura 18. Comparação da superfície da lâmina de água (m) dos cenários referente a vazão de pico entre 2003 e 2006.



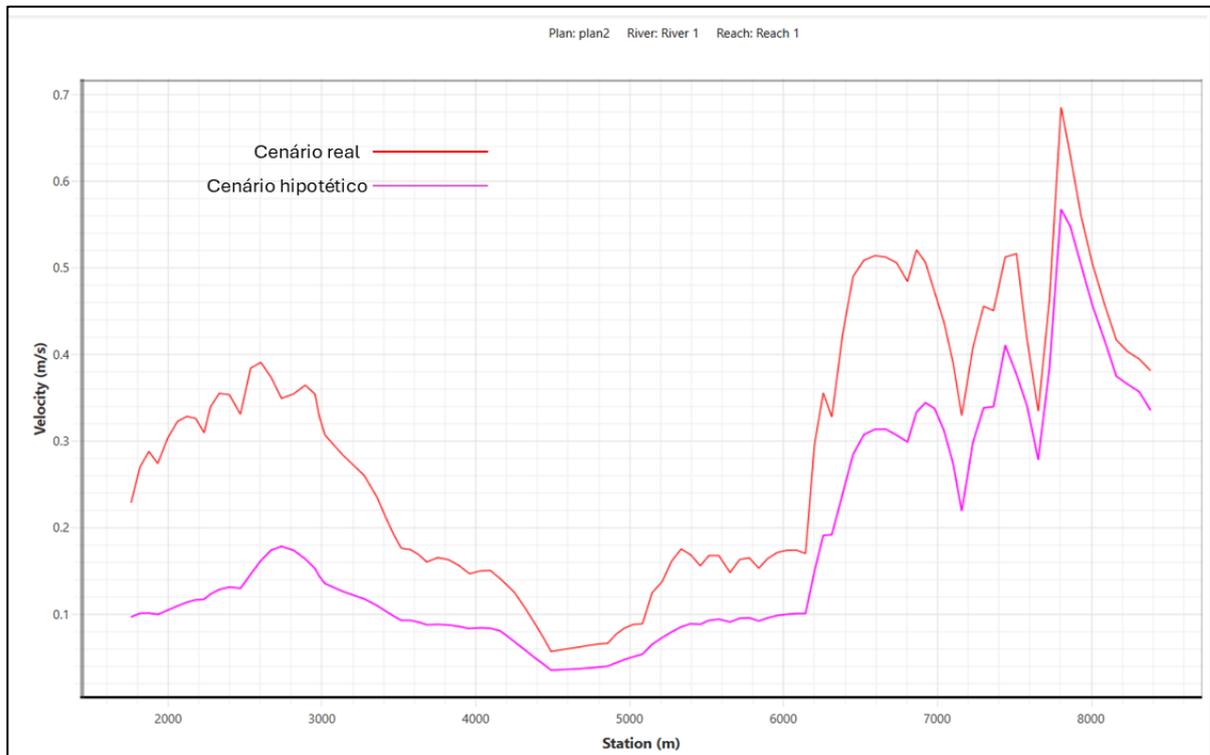
Fonte: Autor, 2025.

Figura 19. Comparação da velocidade do escoamento (m/s) entre cenários ocasionado pela vazão de pico no intervalo entre 2003 e 2006



Fonte: Autor, 2025.

Figura 20. Comparação da velocidade do escoamento (m/s) da água entre os cenários entre os anos de 2003 e 2006.



Fonte: Autor, 2025.

A análise comparativa entre os cenários demonstra que a introdução de vegetação na calha do rio promove um aumento da lâmina d'água e uma maior dispersão lateral da mancha de inundação. Em contrapartida, observa-se uma redução consistente na velocidade do escoamento ao longo de todo o canal, o que contribui para atenuar os efeitos hidrodinâmicos mais intensos. Para o intervalo avaliado, verifica-se que, no cenário hipotético, a lâmina d'água atinge valores próximos de 4,0 metros em relação ao nível do mar, representando um acréscimo de cerca de 30 centímetros em relação ao cenário real, no qual a altura máxima registrada é de aproximadamente 3,6 metros.

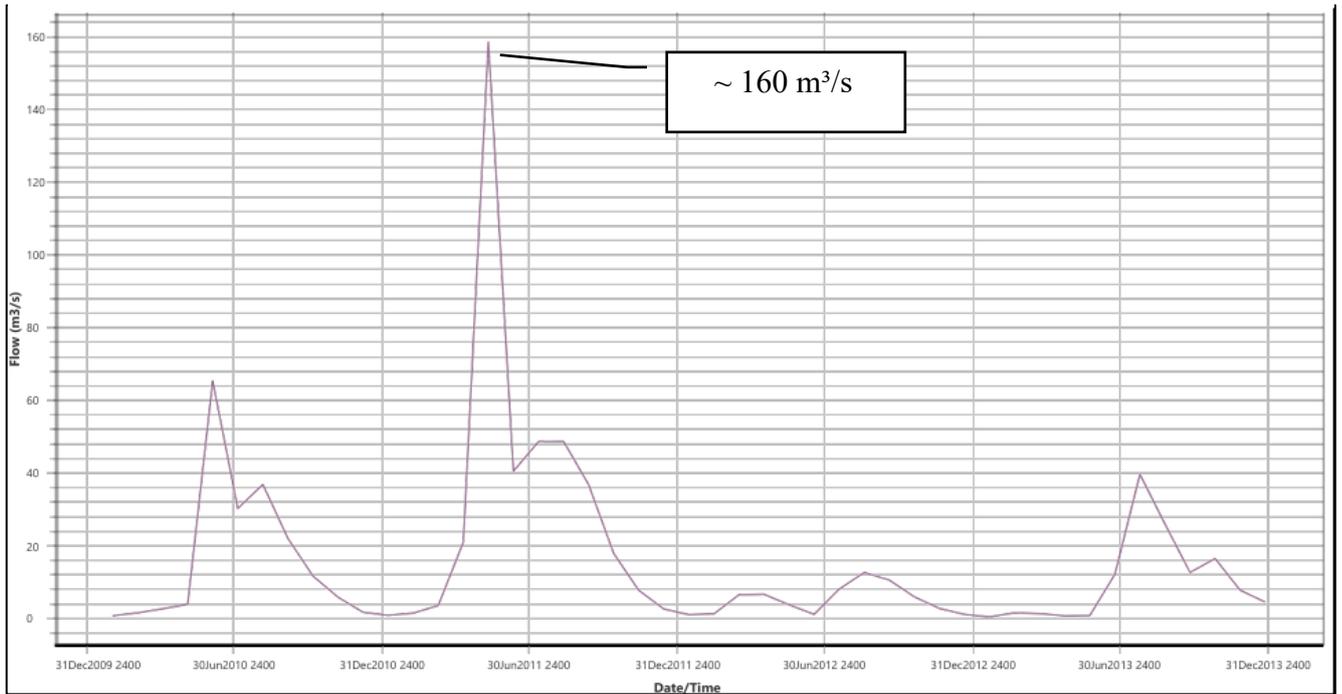
Observa-se também um contraste marcante no comportamento dos vetores de velocidade. No cenário real, os valores são mais elevados, atingindo até 0,68 m/s, com intensidades significativas tanto dentro quanto fora da calha. Já no cenário com a aplicação da vegetação, os vetores concentram-se predominantemente no interior do canal, resultado da

barreira imposta pela cobertura vegetal ao extravasamento da lâmina d'água. Essa condição promove uma redução média de 0,12 m/s, alcançando velocidade máxima de 0,56 m/s. A diminuição da energia do escoamento implica em menores percentuais de extravasamento, sobretudo em trechos mais estreitos do rio, o que se reflete diretamente na mitigação dos impactos potenciais sobre comunidades e bairros localizados nas áreas adjacentes ao Capibaribe.

Verifica-se que, neste intervalo, os cenários analisados apresentam comportamentos complementares em relação à mancha de inundação e ao escoamento. No caso hipotético, a lâmina de água se movimenta de forma mais controlada, encontrando resistência ao longo do canal. Esse barramento imposto pela vegetação reduz a velocidade do escoamento e favorece uma distribuição mais ampla da lâmina de água pelas áreas adjacentes como visto na figura , resultando em um espalhamento maior da mancha de inundação, porém com menor intensidade de fluxo. Em contrapartida, no cenário real, caracterizado pela presença de trechos concretados e pela baixa rugosidade, a ausência de barreiras significativas faz com que a água escoe com maior velocidade, não apenas no interior da calha, mas também no entorno imediato do rio, ampliando os potenciais de impacto em áreas urbanizadas. Como demonstrado na imagem, as diferenças na rugosidade dos cenários condicionam diretamente a dinâmica de propagação da mancha e a intensidade do escoamento.

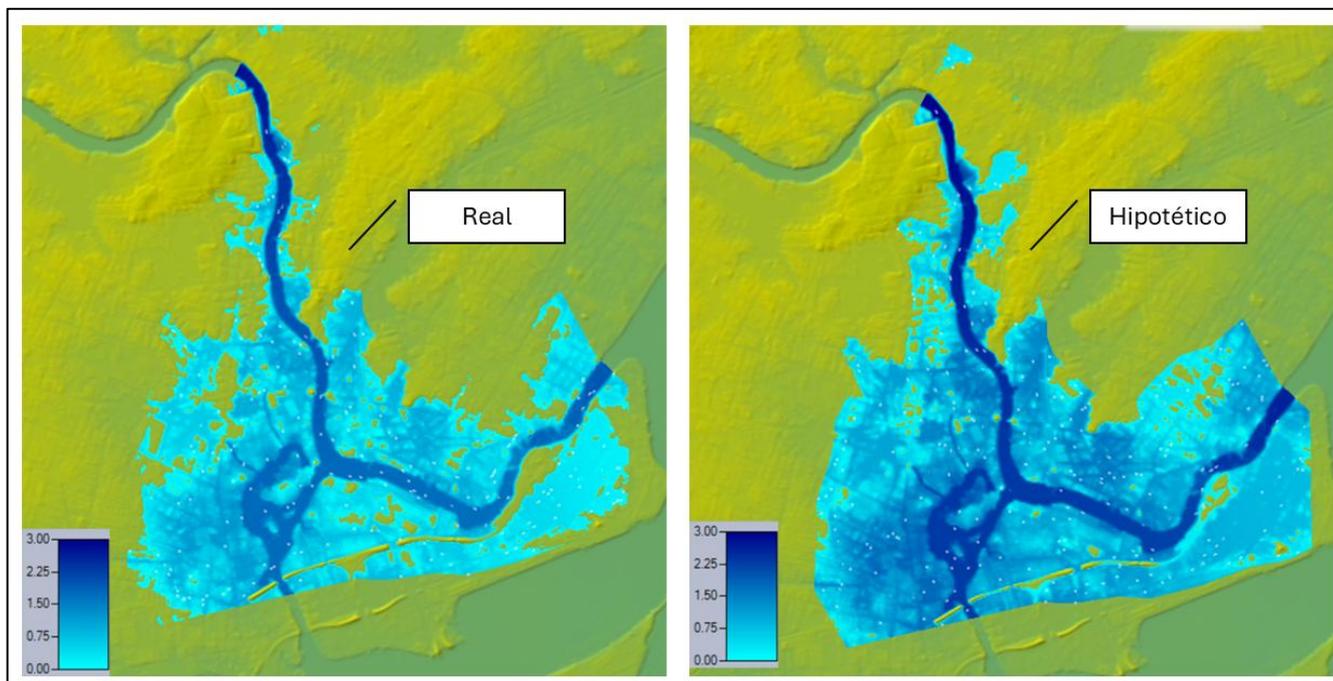
A segunda análise corresponde ao intervalo de 2010 a 2013, onde apresenta como pico de vazão um valor de $160,0 \text{ m}^3/\text{s}$, demonstrado por meio da Figura 26 a seguir. O procedimento deste valor apresenta como resultado a mancha de inundação e velocidade do escoamento demonstrado pelas Figuras 27,28,29, 30 e 31.

Figura 21. Comportamento fluviométrico entre os anos 2010 e 2013



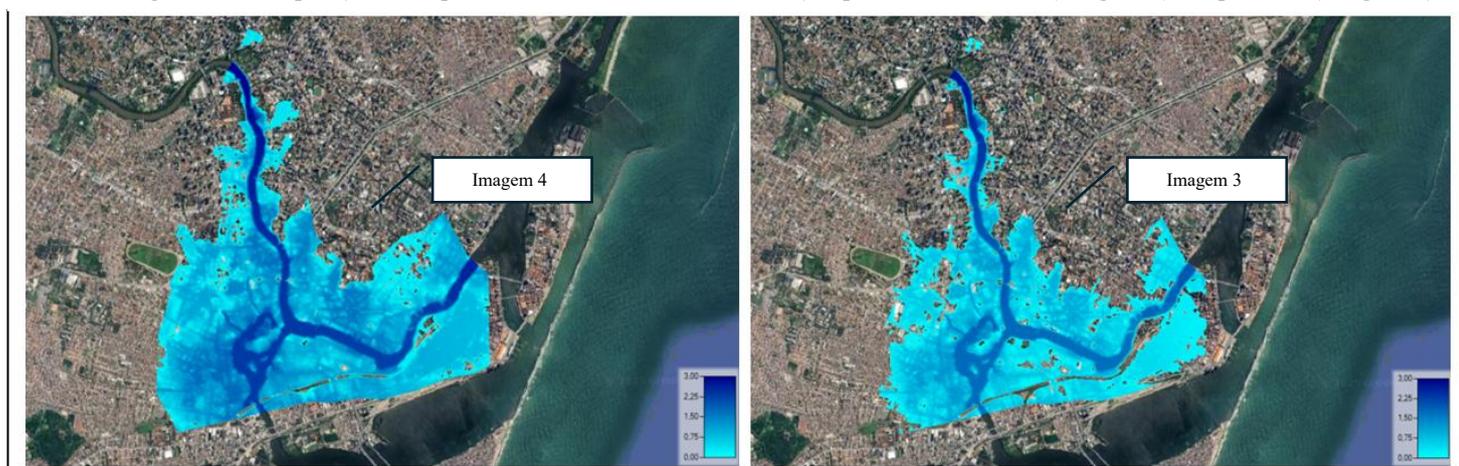
Fonte: Autor, 2025.

Figura 22. Comparação da mancha de inundação entre cenários ocasionado pela vazão de pico no intervalo entre 2010 e 2013.



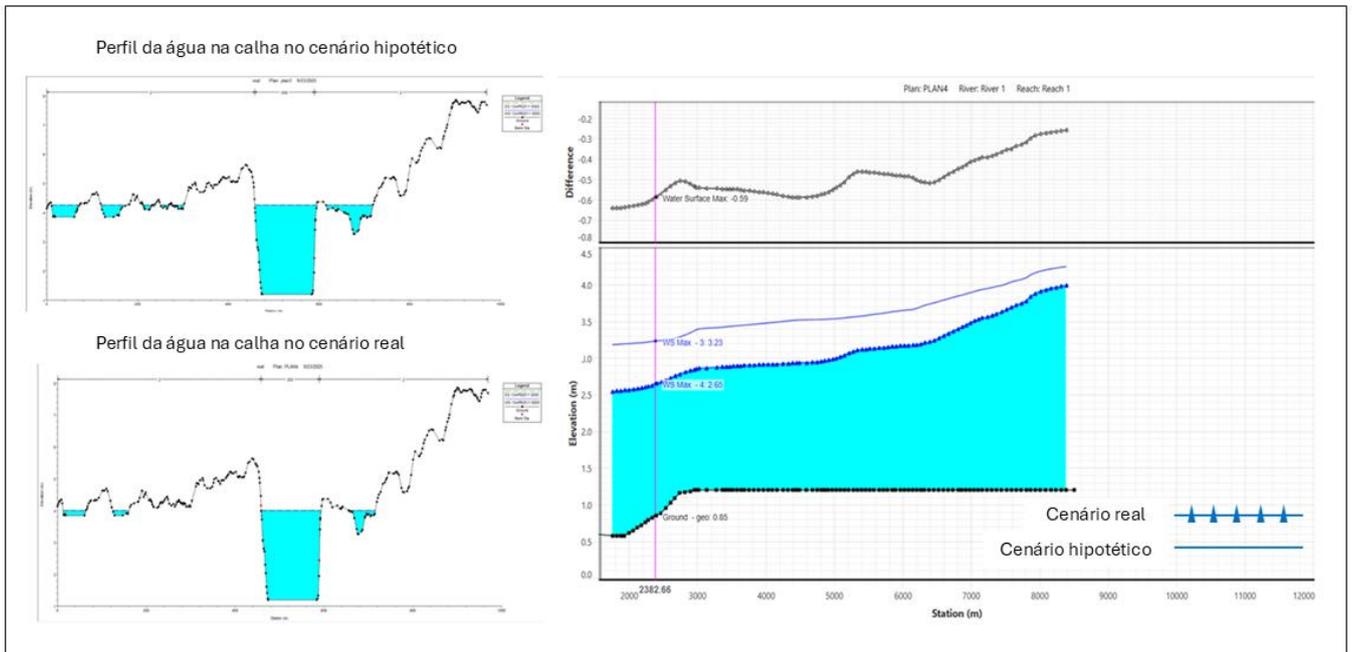
Fonte: Autor, 2025.

Figura 23. Comparação do espalhamento da mancha de inundação para o cenário real (imagem 3) e hipotético (imagem 4).



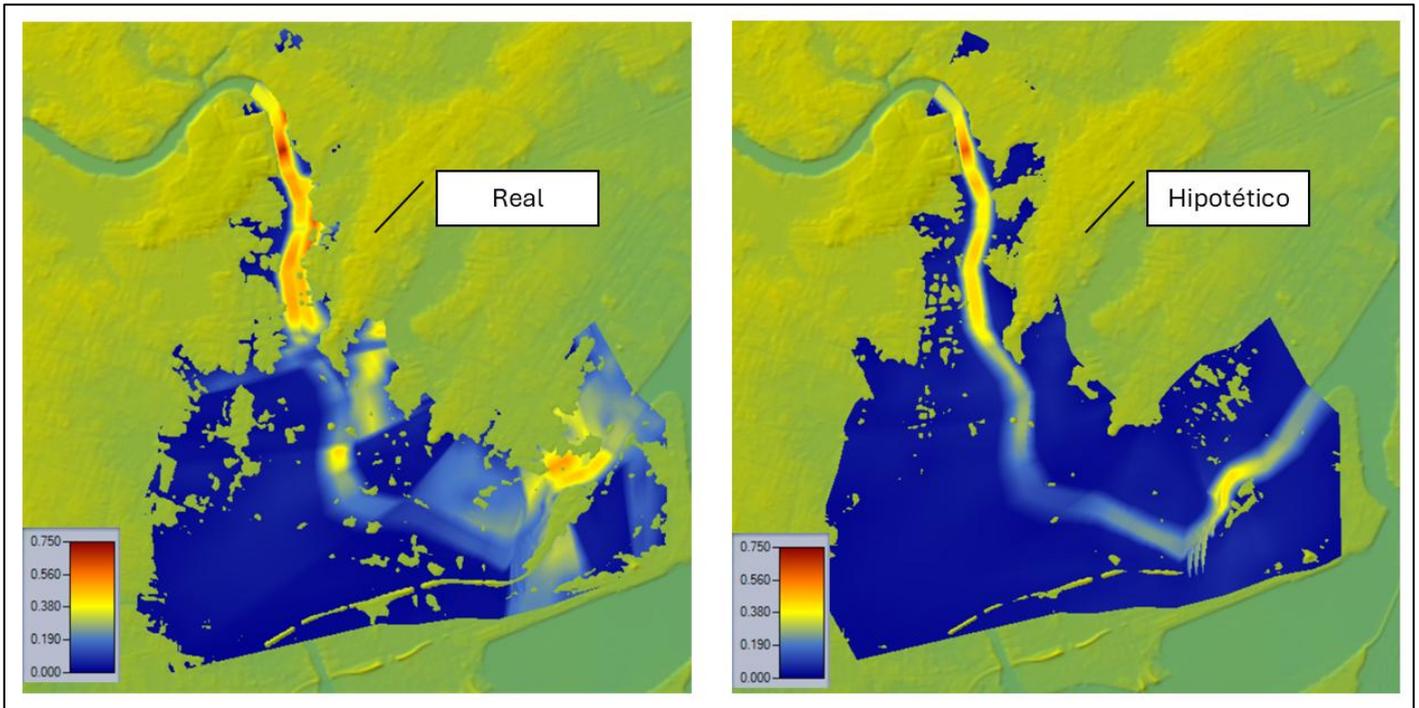
Fonte: Autor, 2025.

Figura 24. Comparação da superfície da lâmina de água dos cenários referente a vazão de pico entre 2010 e 2013.



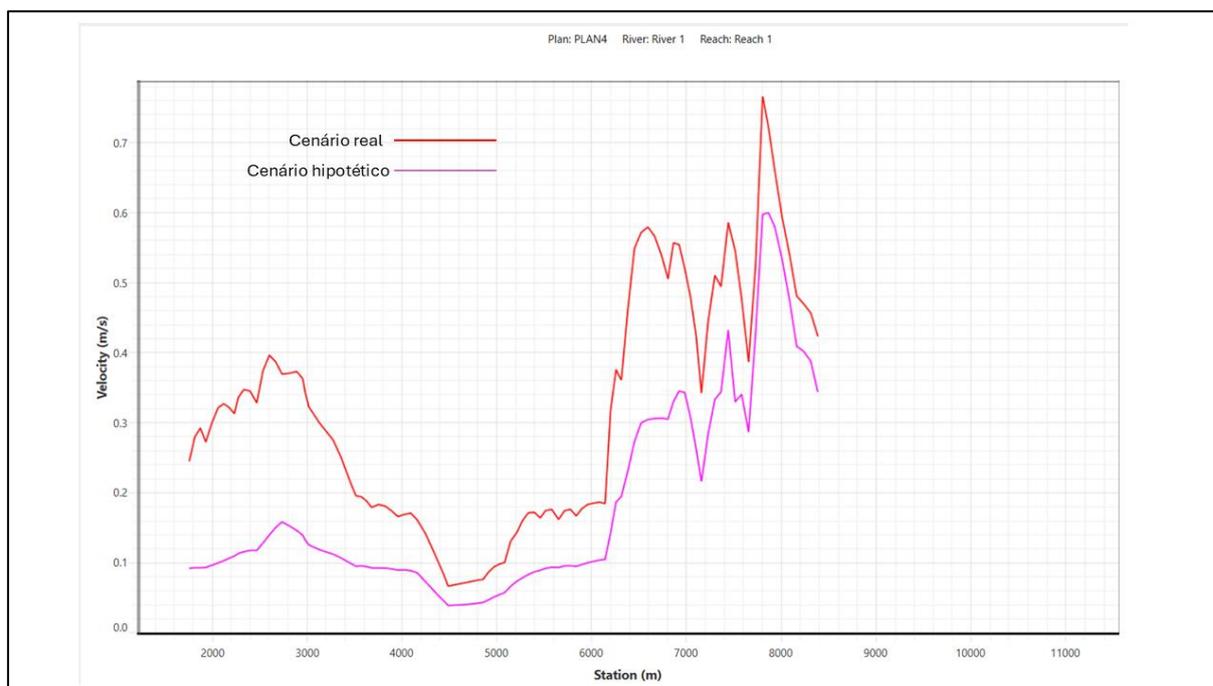
Fonte: Autor, 2025.

Figura 25. Comparação da velocidade de escoamento entre cenários ocasionado pela vazão de pico no intervalo entre 2010 e 2013



Fonte: Autor, 2025.

Figura 26. Comparação do comportamento da velocidade da água dos cenários referente a vazão de pico entre 2010 e 2013.



Fonte: Autor, 2025.

A simulação referente ao período de 2010 a 2013 apresentou os maiores picos de velocidade de escoamento e de profundidade em relação aos três intervalos analisados, sendo o este com o maior percentual de áreas inundadas simuladas. O comportamento da velocidade destacou-se por registrar valores elevados ao longo de quase toda a extensão do trecho analisado. Esse cenário está diretamente associado ao elevado pico de vazão considerado na simulação, que intensificou os impactos hidrodinâmicos e ampliou a propagação da mancha de inundação em quase todo o entorno do rio.

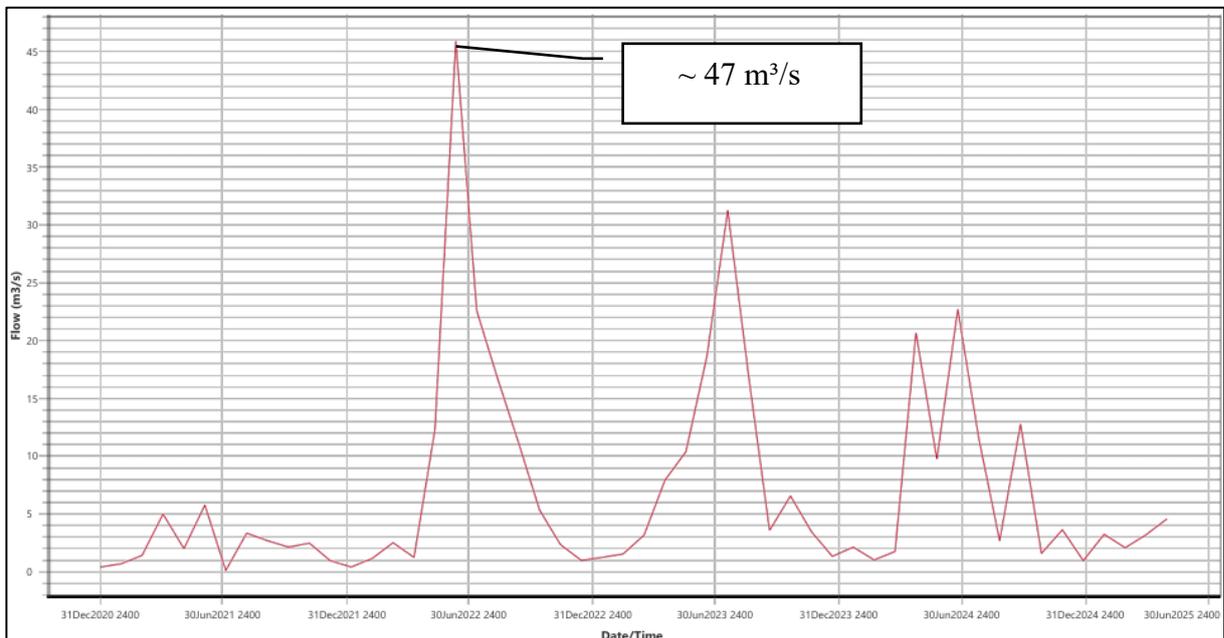
Nesta segunda análise, as diferenças tornam-se ainda mais evidentes, em parte devido ao pico de vazão mais elevado considerado neste intervalo (Figura 26). No cenário real, observam-se áreas de maior intensidade de velocidade que se estendem para além do canal, atingindo regiões adjacentes onde o extravasamento se mostra mais acentuado. Essa condição reflete não apenas a baixa rugosidade da calha concretada, que transmite maior energia ao fluxo, mas também o efeito do maior volume escoado, resultando em manchas mais expressivas e

velocidades mais elevadas. Em contrapartida, no cenário hipotético, mesmo sob um pico de vazão superior, a presença da vegetação mantém o papel de dissipador, restringindo as maiores velocidades ao leito principal do rio. Dessa forma, a mancha de inundação se distribui de maneira mais uniforme e com menor intensidade nas áreas laterais, reduzindo os pontos críticos de extravasamento que se evidenciam no cenário real.

A diferença de valores da cota da lâmina de água nas manchas de inundações é bastante significativa, tendo como máximo valor de cota no cenário hipotético de 4,2 metros e 4,0 metros para o cenário real, ambos em relação ao nível do mar, havendo uma variação de 20 centímetros em sua amplitude. Para a diferença do comportamento de velocidade, o cenário real resultou como maior valor de velocidade 0,78 m/s , enquanto o cenário hipotético de vegetação densa resultou em 0,60 m/s, havendo uma variação de 0,18 m/s.

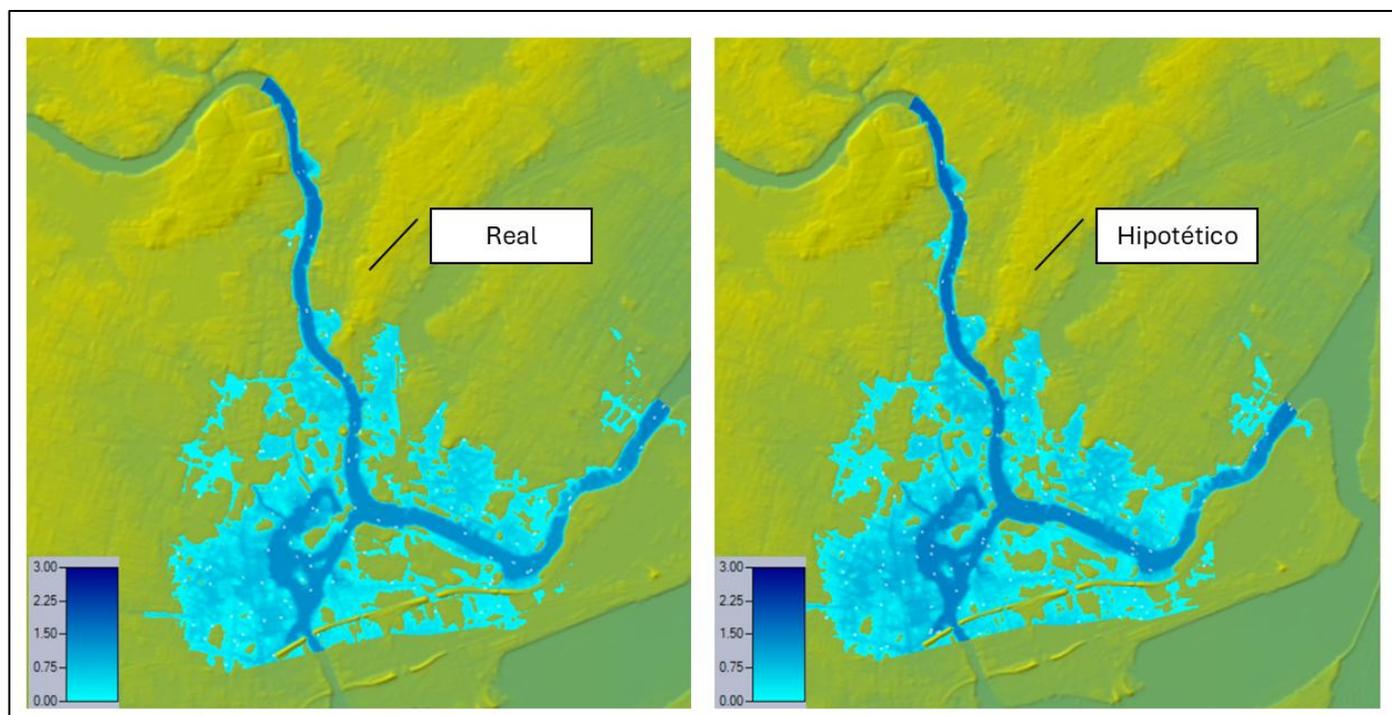
O desempenho das vazões, mancha de inundações e velocidades, utilizando o intervalo de 2021 a 2025 está sendo representado pelas Figuras 32, 33, 34, 35, 36 e 37 a seguir.

Figura 27. Comportamento fluviométrico entre os anos 2021 e 2025.



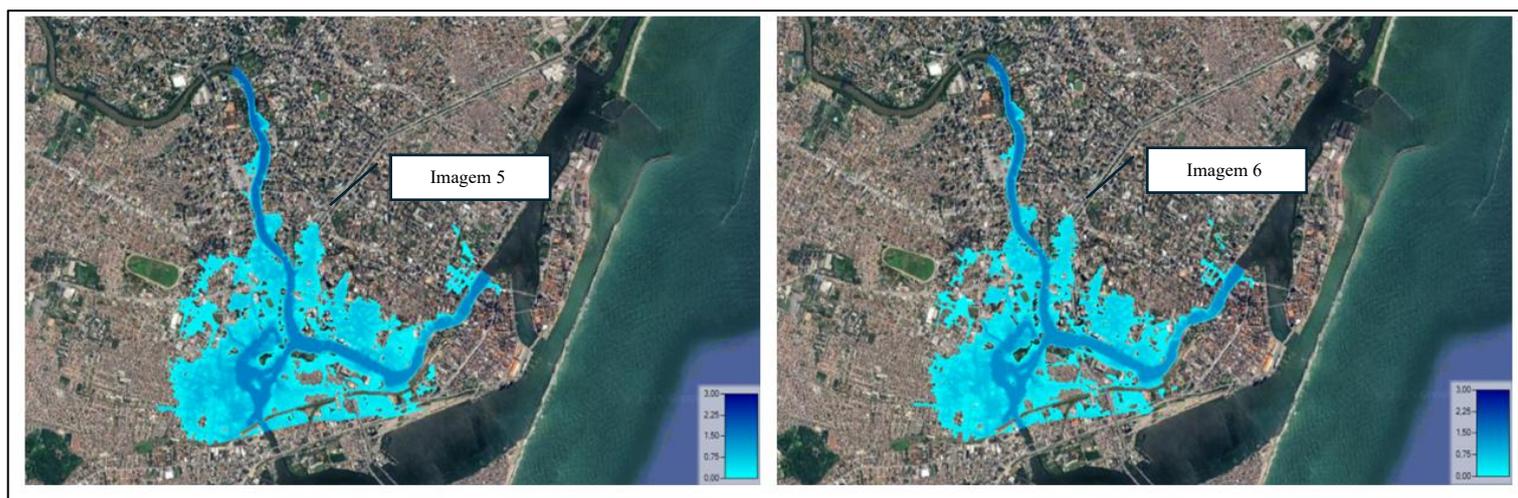
Fonte: Autor, 2025.

Figura 28. Comparação da mancha de inundação entre cenários ocasionado pela vazão de pico no intervalo entre 2020 e 2025.



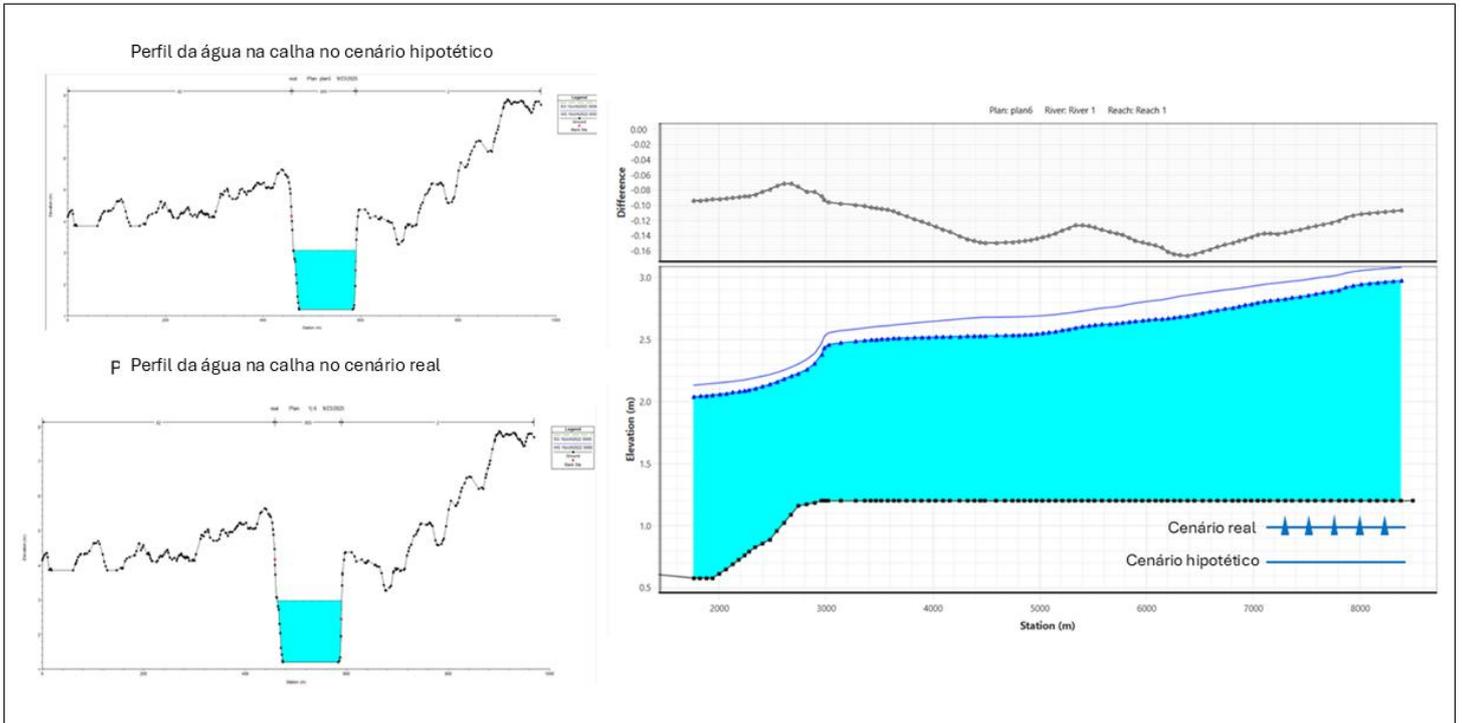
Fonte: Autor, 2025.

Figura 29. Comparação do espalhamento da mancha de inundação para o cenário real (imagem 6) e hipotético (imagem 5).



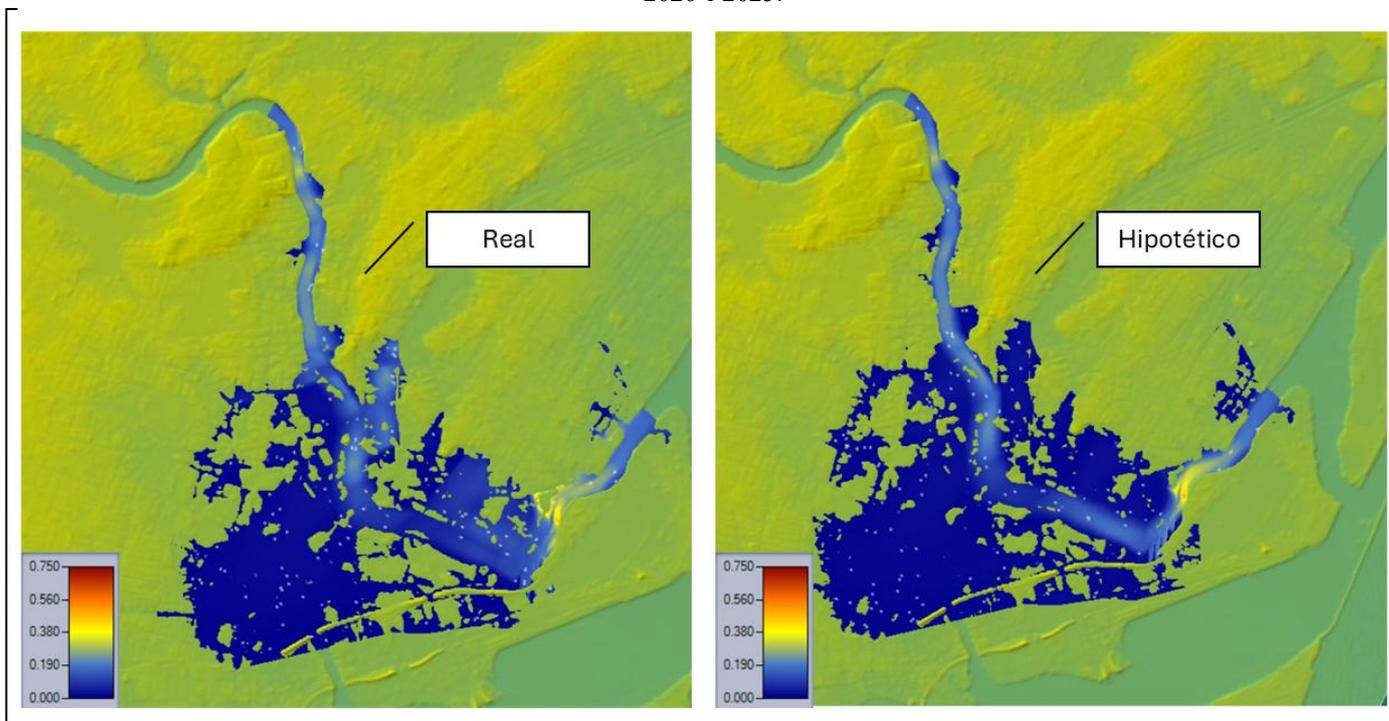
Fonte: Autor, 2025.

Figura 30. Comparação da profundidade da lâmina de água dos cenários referente a vazão de pico entre 2020 e 2025.



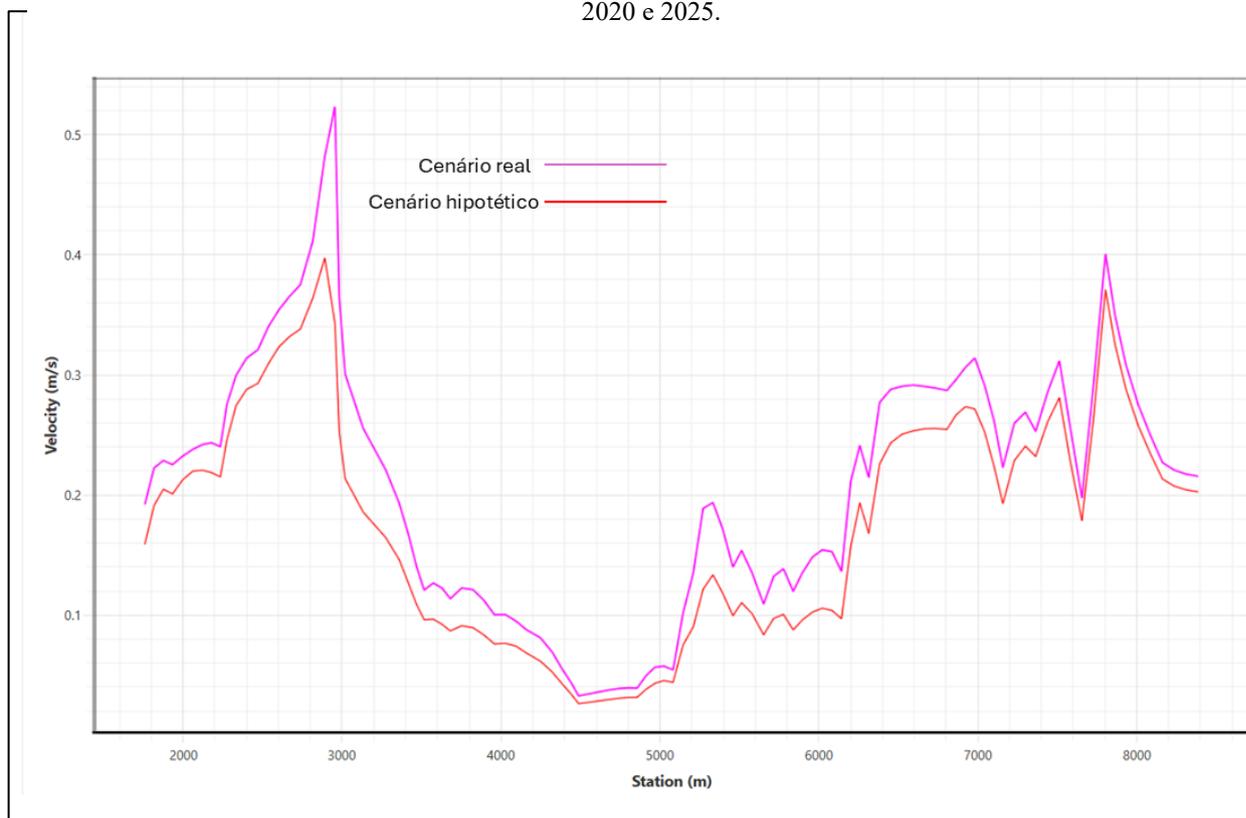
Fonte: Autor, 2025.

Figura 31. Comparação da velocidade de escoamento entre cenários ocasionado pela vazão de pico no intervalo entre 2020 e 2025.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 32. Comparação da profundidade da velocidade da água dos cenários referente a vazão de pico entre 2020 e 2025.



Fonte: Autor, 2025.

A análise dos dados de vazões correspondente aos anos entre 2020 e 2025 resultou em uma menor expansão das manchas de inundações e velocidades, tendo em vista seu baixo valor de pico de vazão neste intervalo, relativo aos outros intervalos simulados. O escoamento apresentou uma velocidade alta de destaque somente na região a montante e jusante do trecho do rio.

Como citado, este intervalo apresentou o comportamento menos significativo em relação aos outros dois simulados, por apresentar menores valores de vazões. Porém, ainda é possível visualizar que a mancha de inundação se comportou de maneira expressiva, impactando bairros e comunidades no entorno do rio, principalmente na região intermediária do trecho. Ao cenário hipotético, vê-se que a mancha de inundação e a velocidade do escoamento apresentaram uma pequena variação, tendo como maior valor da cota da lâmina de

água na mancha de inundação para o cenário hipotético de 3,0 metros, e para o cenário real um valor de 2,8 metros, variando assim 20 centímetros na cota; já para o vetor velocidade, no cenário real, apresentou como maior velocidade no trecho 0,6 m/s, e para o cenário hipotético de 0,4 m/s, diminuindo 0,2 m/s.

Na terceira análise, observa-se um comportamento diferenciado em função da menor vazão de pico adotada em comparação com as análises anteriores. Essa condição resulta em uma mancha de inundação menos expressiva, tanto em extensão quanto em intensidade, refletindo diretamente no volume reduzido do escoamento. No cenário real, ainda é possível identificar pontos de maior velocidade espalhados para além do canal, embora em menor magnitude, indicando que mesmo sob vazões mais baixas a calha de baixa rugosidade continua a favorecer extravasamentos localizados. Já no cenário hipotético, a presença da vegetação mantém o papel de atenuar as velocidades e redistribuir o fluxo, restringindo os valores mais elevados ao leito principal. Assim, a mancha de inundação se apresenta mais contida e homogênea, com menor energia associada ao escoamento, reforçando o efeito dissipador da vegetação também sob condições de menor pico de vazão.

Os três intervalos simulados apresentaram comportamentos semelhantes quanto à expansão da mancha de inundação e ao fluxo de água. De forma geral, compreende-se que, quanto maior for os valores de vazão, menor é a capacidade do rio de acomodar o volume de água, o que intensifica o extravasamento para as áreas adjacentes (Chow et al., 1988). Esse efeito se mostra ainda mais expressivo em regiões planas e próximas ao nível do mar, onde os baixos valores altimétricos favorecem a ocorrência de inundações e alagamentos (Teng et al., 2017).

Além disso, em áreas urbanas, a presença de canais concretados potencializa a velocidade do escoamento, tornando-o mais intenso quando comparado a cursos naturais (Huang et al, 2024). Por outro lado, a introdução de vegetação no entorno da calha, conforme testado no cenário hipotético, contribuiu para a redução da velocidade do escoamento, reforçando sua importância como medida mitigadora a enxurradas (Kashyap & Barman, 2025).

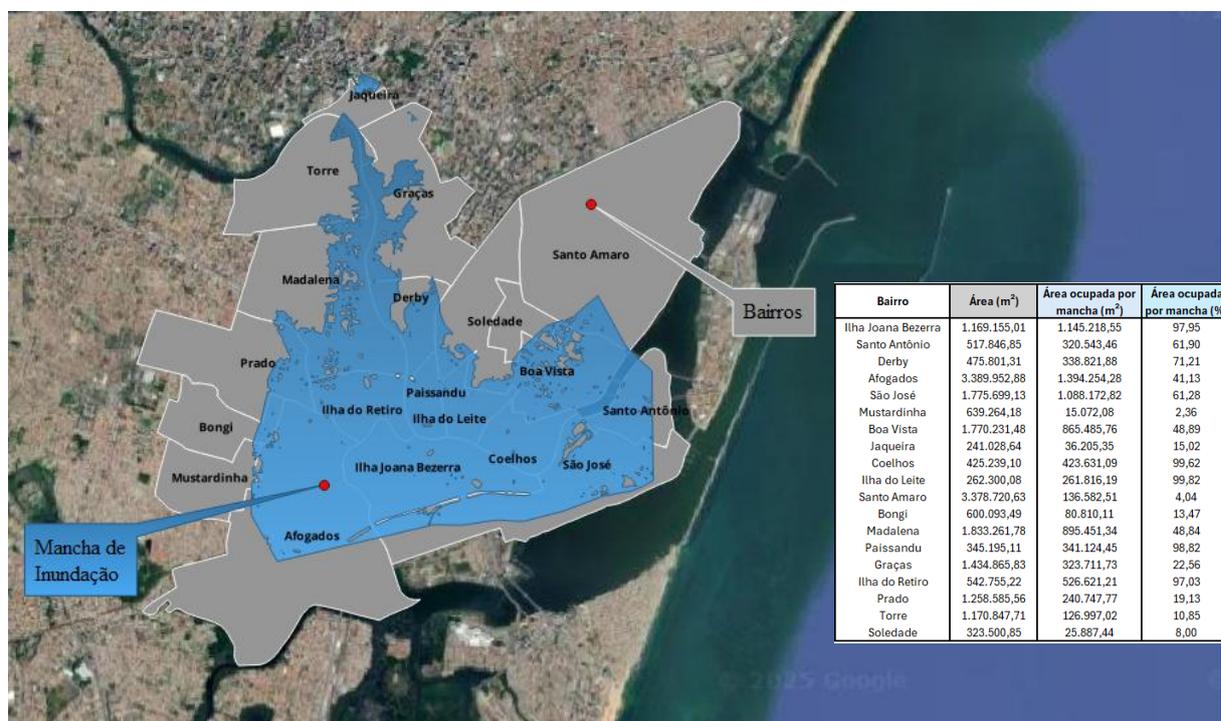
O espalhamento do vetor velocidade no entorno do rio, por presença de elementos como vegetação, obstáculos ou rugosidade aumentam a resistência ao escoamento, elevando o

arrasto e forçando o fluxo a buscar caminhos de menor resistência, frequentemente desviando para áreas adjacentes menos obstruídas, e dessa forma fazendo com que o fluxo escoe com menos impactos dentro e fora do canal (Wu, 2022; Powell, 2014). Diferentemente, os canais em concreto, caracterizados pela baixa rugosidade, apresentam, neste caso e sob tais condições, uma menor capacidade de concentrar o escoamento no interior da calha, favorecendo o extravasamento livre das águas para as áreas adjacentes ao rio.

De modo geral, a análise do comportamento da mancha de inundação ao longo dos três intervalos de tempo evidencia que a presença de vegetação na calha do rio promove um espalhamento mais amplo da mancha, decorrente da maior rugosidade hidráulica, que reduz a velocidade do escoamento e favorece o extravasamento lateral. Além disso, observa-se um aumento da lâmina d'água, já que a resistência imposta pela vegetação ao fluxo propicia o acúmulo e o represamento da água dentro do canal. Consequentemente, há também uma diminuição da velocidade do escoamento, reduzindo a energia do fluxo, primordial na mitigação de enxurradas em áreas urbanas. Em outras palavras, a presença de vegetação faz com que a água se distribua de forma mais difusa, com níveis ligeiramente mais elevados, mas com menor intensidade de fluxo. Por outro lado, no cenário real, com trechos concretados, a mancha de inundação permanece mais confinada, a lâmina d'água é relativamente menor e a velocidade do escoamento aumenta, intensificando o risco de enxurradas e o transporte de sedimentos, o que amplia os impactos sobre as áreas urbanas adjacentes. Assim, a comparação entre os cenários demonstra que a calha vegetada tende a proporcionar uma inundação mais espalhada e controlada, enquanto a calha concretada concentra o escoamento e potencializa os efeitos hidrodinâmicos adversos.

Dentre todos os anos analisados, as maiores vazões simuladas encontram-se, como já discutido, entre os anos de 2010 e 2013, sendo o ano de 2011 apresentando as maiores vazões de pico de toda a série, inundando uma área de 8.725.199,74 m², que se espalhou por diversos bairros de adensamento urbano, considerando o cenário hipotético, como pode ser visto na figura abaixo.

Figura 33. Quantificação da ocupação da área da mancha de inundação (cenário hipotético) em cada bairro



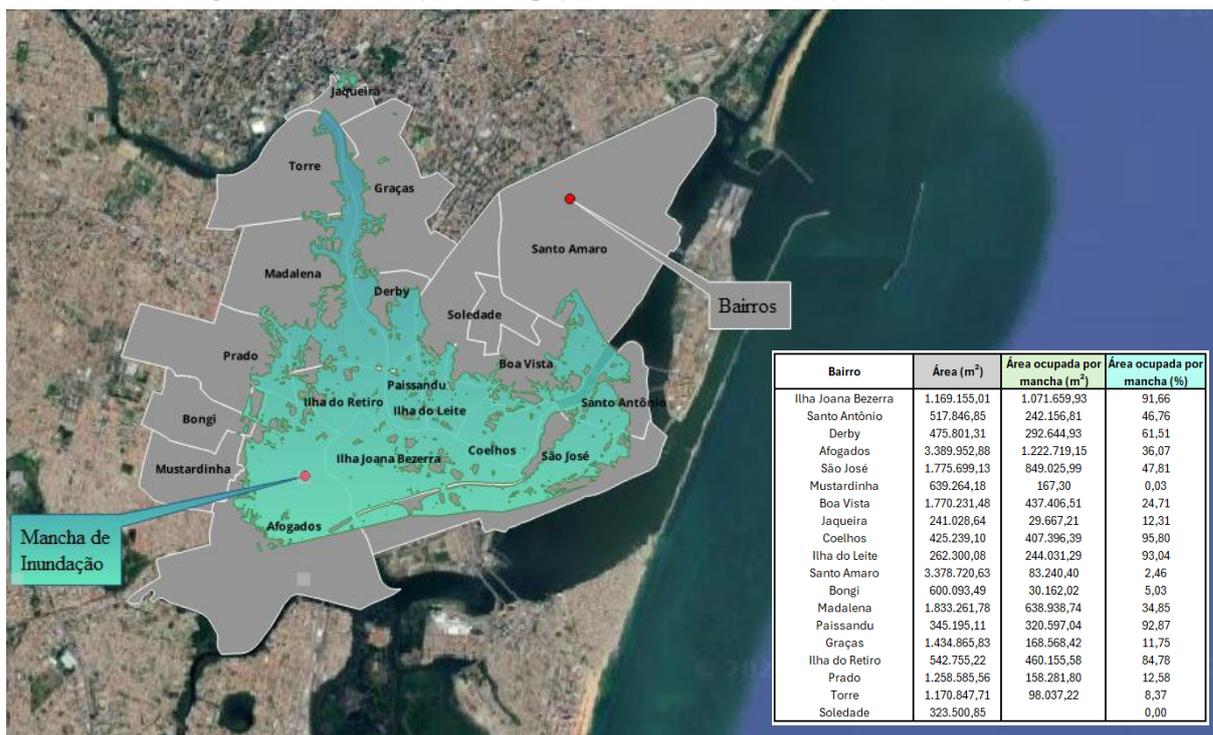
Fonte: Autor, 2025.

Dentre os bairros mais afetados nesta simulação, Ilha do leite, Coelhoos, Paissandu e Ilha Joana Bezerra se destacam como os mais afetados com a mancha de inundação, sobrepondo todos em mais de 95% da área total do bairro. Já é extensamente documentado que estes bairros apresentam uma alta frequência de inundações; o mapa municipal de suscetibilidade a inundações de Recife (CPRM, 2015) identifica a planície central do Capibaribe — onde ficam Ilha do Leite, Coelhoos e Ilha Joana Bezerra — como faixa com alta suscetibilidade a inundações, consolidando o histórico de eventos nessas áreas; a dissertação de Verçosa em 2019, realiza simulação hidrológica e hidrodinâmica e encontra os mesmos bairros atingidos por uma mancha de inundação simulada.

Especificadamente no ano de 2011, foi amplamente exposto na mídia que as águas invadiram o terminal da estação de metrô da Ilha Joana Bezerra, causando a paralização da bilheteria, e fechamento do terminal temporariamente (G1, 2011), situação que tornou a acontecer no ano de 2013.

Posteriormente, foi realizado uma nova amostragem para analisar o percentual de bairros impactados pela mancha de inundação utilizando o cenário real. A Figura 39 abaixo expressa a mesma relação de área interseccionada nos bairros atingidos. É possível observar que, a área atingida pela mancha de inundação nos bairros é menor em cada um deles, sendo suficiente para não atingir e sobrepor o bairro Soledade, que se encontrava mais distante da mancha de inundação, e entre cotas mais elevadas, que anteriormente havia sido atingido.

Figura 34. Quantificação da ocupação da mancha de inundação (cenário real) por bairro.



Fonte: Autor, 2025.

A vegetação oferece resistência ao escoamento, desacelera a água e permite que ela se espalhe mais amplamente pelas áreas adjacentes, fazendo com que a água chegue de maneira mais lenta nos bairros atingidos, tendo menos possibilidades de eventos devastadores ocasionados pela energia do escoamento. Como resultado, a mancha de inundação se torna mais extensa e, em certos pontos, a profundidade da lâmina d'água pode aumentar. Isso ocorre porque a água tem mais tempo para se acumular e se distribuir lateralmente, resultando em uma lâmina de água mais profunda em algumas áreas, como dito anteriormente.

Mediante a análise da simulação dos três intervalos temporais computados para os cenários avaliados com aplicações reais e hipotéticas do *Manning*, deve-se salientar que a quantificação das áreas vegetadas no entorno de rios deve sempre considerar, em conjunto, a série histórica de vazões e o perfil altimétrico das áreas adjacentes, pois em condições de vazões elevadas aumentam as chances de transbordamento e de inundações em comunidades situadas em cotas mais baixas (USACE, 2002). De modo geral, a mata ciliar eleva a resistência ao escoamento e redistribui de maneira concentrada a mancha de inundação. Em regiões costeiras de baixa altitude em relação ao nível do mar e às cotas fluviais, como Recife, a priorização de estudos sobre dinâmica fluvial em eventos críticos é essencial, dado o histórico de vulnerabilidade e eventos recentes de cheias e deslizamentos (MARENGO et al., 2023). Assim, a avaliação da vegetação em calhas fluviais deve integrar explicitamente o relevo (DEM/perfil topográfico) às análises hidrológicas e hidrodinâmicas de escoamento e de inundação, com ênfase em áreas urbanas de baixa altitude (USACE, 2002).

5.3. Análise de registros de inundações em comparação as simulações de mancha de inundações

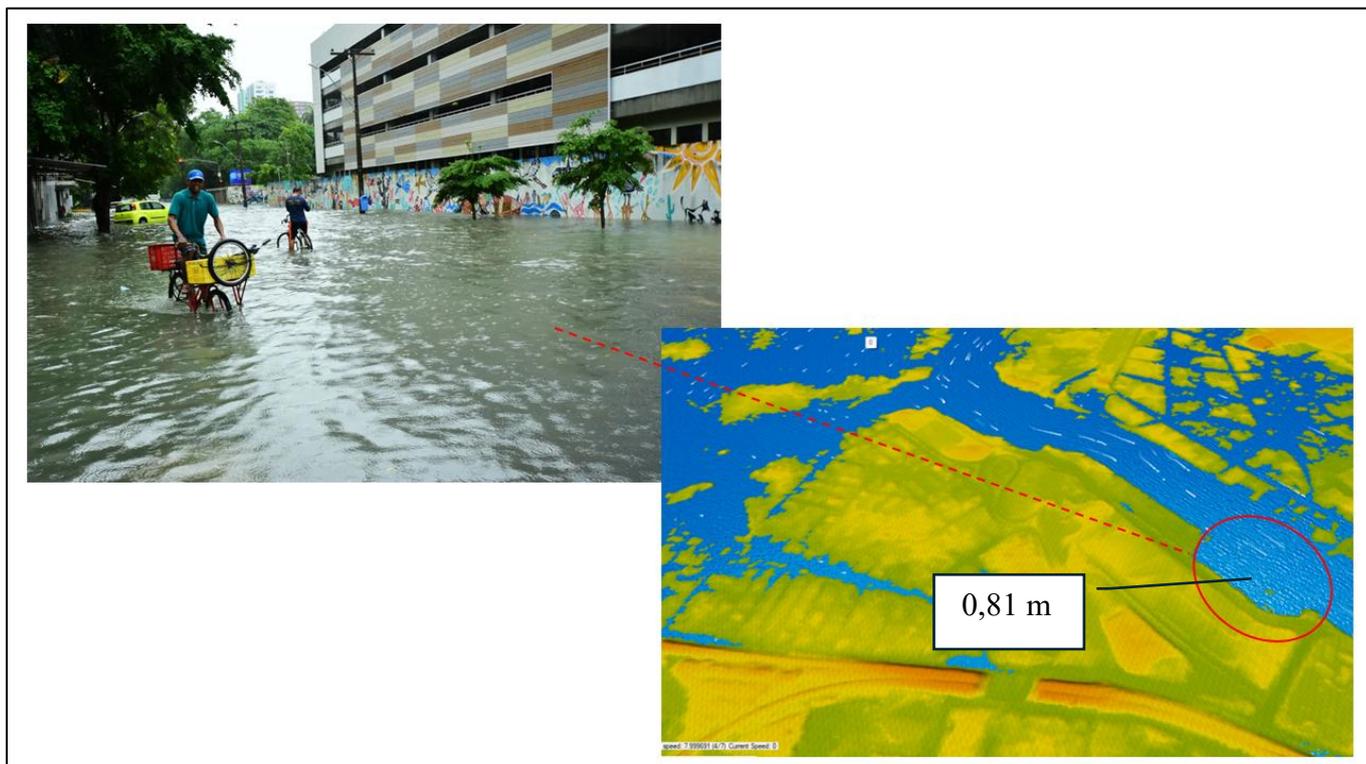
Para confrontar os resultados de modelagem com ocorrências reais, foram levantados registros de inundações no Recife em meses que coincidem com os picos de vazão simulados em cada intervalo analisado.

Em junho de 2005, relatos apontam que o Rio Capibaribe transbordou em meio a dias de chuva forte, com alagamentos extensos, deslizamentos e remoções de famílias em vários bairros do Recife; vias e barreiras urbanas ajudaram a reter a água e criaram bolsões persistentes. Esses registros aparecem em notas e pronunciamentos oficiais da época e em coberturas jornalísticas locais (BRASIL, 2005). Esse evento condiz com a simulação da mancha de inundação gerada (Figura 21) para o ano de 2005, onde o comportamento mapeado condiz com esse quadro de mancha de inundações fragmentadas, com lâminas d'água separadas por áreas urbanas com maiores índices altimétricos e retenções localizadas. Compreende-se também que os registros históricos afirmam que comunidades no entorno do rio Capibaribe foram as mais afetadas.

No ano de 2011 a cidade voltou a enfrentar episódios intensos, com volumes acima do normal costurando contextos de inundações ao longo das margens do Capibaribe. Órgãos estaduais registraram níveis elevados em trechos da bacia e influência de maré, aumentando a conectividade das áreas inundadas (APAC, 2011). Assim como a análise de 2005, a mancha de inundação simulada confirma o histórico do período, sendo o evento de inundação dentro do intervalo analisado (1990 – 2025) com maior impacto já registrado na cidade de Recife.

No período 2021–2025, o maior valor simulado ocorreu em junho de 2022, mês em que se confirmou um evento hidrológico extremo que ilhou diversos bairros ribeirinhos do Rio Capibaribe, incluindo comunidades às margens do rio e a área do Fórum Des. Rodolfo Aureliano (Ilha Joana Bezerra), conforme ilustrado na Figura 40. Para os demais intervalos, 2003–2006 (pico em 2005) e 2010–2013 (pico em 2011), não foram localizadas imagens jornalísticas ou acadêmicas que mostrem bairros alagados ou inundados; encontraram-se apenas relatos textuais sobre isolamento de áreas urbanas nos mesmos meses de pico identificados nas simulações.

Figura 35. Validação registral da mancha simulada



Fonte: Autor, 2025.

6. CONCLUSÕES

As conclusões se apoiarão tanto nos métodos utilizados quanto nos resultados do estudo, principalmente quando se fala da precisão de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos em estudos de cheias com aplicações de imagens LiDAR.

- Dados LiDAR mostraram-se decisivos para caracterizar o comportamento altimétrico do terreno, elevando o detalhamento dos resultados em modelos hidrológicos e hidrodinâmicos graças ao alto detalhamento do MDT/MDE.
- O levantamento LiDAR foi eficiente no delineamento de bacias e redes de drenagem, viabilizando extrações mais detalhadas de direção/acumulação de fluxo e reduzindo incertezas topográficas na modelagem hidrológica.
- O SWAT demonstrou boa eficiência computacional e flexibilidade na simulação de vazões, permitindo testar cenários e janelas temporais distintas com consistência.
- A calibração de vazão pelo modelo SWAT apresentou limitações devido ao elevado tempo de processamento na calibração automática e à necessidade de ajustes manuais minuciosos, exigindo a alteração individual dos parâmetros sensíveis.

- O HEC-RAS se mostrou eficaz para mapear manchas de inundações e comparar resultados entre intervalos de tempo, capturando padrões de extravasamento condizentes com a morfologia do canal e a ocupação urbana.
- A visualização dinâmica do escoamento no HEC-RAS (vetores, velocidades e rotas de extravasamento) provou-se valiosa tanto para análises em grande escala (trechos urbanos) quanto para pontos específicos, apoiando diagnósticos minuciosos de eventos locais e a priorização de intervenções.
- A integração dos produtos (LiDAR → SWAT → HEC-RAS) formou uma cadeia consistente importante para realização de uma modelagem hídrica completa, reduzindo a propagação de incertezas topográficas para a hidrologia e, desta, para a hidráulica, aumentando a confiabilidade espacial das manchas de inundações e a utilidade dos mapas para decisão.
- A comparação entre a mancha simulada em parte do trecho e o evento real de junho/2022 evidenciou correspondência espacial, validando a fidelidade das simulações frente a eventos registrados e reforçando a capacidade preditiva da integração entre LiDAR, SWAT e HEC-RAS adotada no estudo.
- A aplicação de análises comparativas entre cenários de geometria se mostrou bastante significativa, mostrando a importância de estudos hidráulicos nos impactos a ocupações ribeirinhas.
- A utilização do SWAT Plus para realização de vazões simuladas, calibradas e validadas, em áreas onde carecem de dados fluviométricos foi de grande importância a análise do comportamento do escoamento em regiões com índices topográficos desfavoráveis, como Recife.
- A modelagem hidrodinâmica com o HEC-RAS permitiu entender e compreender por meio de análises comparativas com eventos históricos reais como funciona a expansão da mancha de inundações em eventos críticos.
- A integração do SWAT com o HEC-RAS se mostrou promissor em planejamentos e projetos hidráulicos e urbanos, tomados como ferramentas essenciais principalmente em áreas de riscos.

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, algumas recomendações serão sugeridas principalmente em etapas metodológicas.

- Realizar uma simulação hidrológica com aplicações de dados diários, para que dessa forma os resultados de vazões simuladas permitam uma análise mais criteriosa do comportamento fluviométrico.
- Trabalhar com dados diários como dados de entrada no modelo hidrodinâmico, fazendo com que o modelo realize mancha de inundações diárias mais precisas para o intervalo de tempo trabalhado na área de estudo.
- Realizar uma aplicação para o regime permanente no HEC-RAS, fazendo com que haja uma análise comparativa e qualitativa da escolha para a modelagem hidrodinâmica.
- Realização de uma análise comparativa com o processamento hidrodinâmico com dados reais presentes no trecho escolhido (permitindo uma calibração) e com dados simulados.
- Realizar uma simulação 2D para melhor configuração da geometria dos canais e maior detalhamento de eventos hidrodinâmicos nas cheias.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Informe anual 2023. Brasília: ANA, 2023. Nota de divulgação, 2 fev. 2024. Disponível em: Portal Gov.br. Acesso em: 26 set. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Atlas de vulnerabilidade a inundações: Região Nordeste. Brasília: ANA, 2014. Disponível em: catálogo da Biblioteca da ANA (com acesso ao PDF regional). Acesso em: 26 set. 2025.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA (APAC). Atlas climatológico do Estado de Pernambuco. Recife: APAC, 2021. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/images/webAtlas-Climatologico-do-Estado-de-Pernambuco-APAC.pdf>

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. *Geoportal da APAC*. Disponível em: <https://geoportal.apac.pe.gov.br/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=7486c16fb79545f0be0dd7152c0592a6>. Acesso em: 16 jun. 2025.

AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS). ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data: Edition 2. Bethesda, MD: ASPRS, 2023. Disponível em: https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2024/03/October2023_HLA-Positional_Accuracy_Standards.pdf

AON. *Climate and Catastrophe Insight: 2024 Annual Report*. London: Aon plc, 2024. Disponível em: <https://assets.aon.com/-/media/files/aon/reports/2024/climate-and-catastrophe-insights-report.pdf>. Acesso em: 24 set. 2025.

ARCHFIELD, S. A.; HIRSCH, R. M.; VIGLIONE, A.; BLÖSCHL, G. Fragmented patterns of flood change across the United States. *Geophysical Research Letters*, v. 43, n. 19, p. 10232–10239, 2016.

ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANSON, C. L.; NEITSCH, S. L. Soil and Water Assessment Tool: Input/Output Documentation, Version 2012. Temple: Texas Water Resources Institute, 2012.

ARNOLD, J. G. et al. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012.

BARNES, R.; LEHMAN, C.; MULLA, D. J. Priority-flood: an optimal depression-filling and watershed-labeling algorithm for digital elevation models. *Computers & Geosciences*, v. 62, p. 117–127, 2014. DOI: 10.1016/j.cageo.2013.04.024.

BARROS, Beatriz Carvalho de. *Sistema de informações geográficas e sensoriamento remoto visando modelagem de inundações e alagamentos em Recife, Pernambuco*. Recife: Instituto Federal de Pernambuco, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/handle/123456789/1696>. Acesso em: 13 jun. 2025.

BEIJA, Pedro. Rio Capibaribe atinge nível de alerta, com risco de inundação em áreas do Recife, Camaragibe e São Lourenço. *Jornal do Commercio*, 05 fev. 2025. Disponível em: <https://jc.uol.com.br/pernambuco/2025/02/05/rio-capibaribe-atinge-nivel-de-alerta-com-risco-de-inundacao-em-areas-do-recife-camaragibe-e-sao-lourenco.html>. Acesso em: 13 jun. 2025.

BRASIL, Ministério da Integração Nacional, 2013: Anuário brasileiro de desastres naturais, Brasília: Ministério da Integração Nacional/Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil/Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres, 2014.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). *Projetos do Serviço Geológico do Brasil são destaque em assembleia na Espanha*. Brasília: SGB, 25 set. 2025. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/w/projetos-do-servico-geologico-do-brasil-sao-destaque-em-assembleia-na-espanha>. Acesso em: 25 set. 2025.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A.; LLOYD, C. D. Principles of Geographical Information Systems. 3. ed. Oxford: Oxford University Press, 2015.

CASTRO, Afonso Celso Vanoni de; ALVIM, Angélica Tanus Benatti. Urbanização e gestão de riscos hidrológicos em São Paulo. **Cadernos Metrópole**, v. 24, n. 54, p. 669-695, 2022. DOI: 10.1590/2236-9996.2022-5410.

CEMADEN - **Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais** (CEMADEN). (2023) acessado em [07/08/2024] através do link: [<https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/pesquisadores-brasileiros-fazem-recomendacoes-analisando-as-repentinas-inundacoes-e-deslizamentos-de-terra-em-recife-pe-apos-fortes-chuvas-ocorridas-em-maio-de-2022>].

CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Pesquisadores brasileiros fazem recomendações analisando as repentinas inundações e deslizamentos de terra em Recife (PE) após fortes chuvas ocorridas em maio de 2022.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR). Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. Atlas Digital de Desastres no Brasil (filtros: Região = Nordeste; Período = 2013–2024). Brasília: MIDR, 2025. Disponível em: atlasdigital.mdr.gov.br. Acesso em: 26 set. 2025. (Painel dinâmico com dados consolidados 1991–2024.)

CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B.; BLÖSCHL, G. Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. *Nature Communications*, v. 13, art. 5136, 2022. Acesso em: 11 jun. 2025.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1988.

CNN Brasil. Quase 4 milhões de brasileiros moram em 13 mil áreas de risco, diz levantamento. CNN Brasil, 2025. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/quase-4-milhoes-de-brasileiros-moram-em-13-mil-areas-de-risco-diz-levantamento/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

COLLISCHONN, Walter; FAN, Fernando M.; POSSANTTI, Ismael; et al. The exceptional hydrological disaster of April–May 2024 in southern Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**, v. 30, 2025.

COLLISCHONN, Walter; PAIVA, Rodrigo C. D.; WONGCHUIG-CORRÊA, Saulo; et al. Unprecedented April–May 2024 rainfall in South Brazil sets new record. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**, v. 29, e50, 2024. DOI: 10.1590/2318-0331.292420240088.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE (CBH-Doce). Relatório Anual de Acompanhamento das Ações (vários anos). Compila a cheia de 1979 com 47.776 desabrigados, 74 mortos e 4.424 residências danificadas.

CPRM. “Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Recife – PE.” CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2015. Acesso em 19/09/2025: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/15030>.

DANTAS, A. E. de. “*Incorporação de Imageamento aéreo de alta resolução em modelos hidrodinâmicos para geração de mancha de inundação em um trecho de rio rural* 2024. Universidade Federal da Paraíba, Trabalho de Conclusão de Curso.

DRUMOND, Rafael Augusto Santos; ALMEIDA, Renan Pereira; NASCIMENTO, Nilo de Oliveira. **Mudanças climáticas e Plano Diretor: mitigação de inundações em Belo Horizonte**. *Cadernos Metrópole*, v. 25, n. 58, p. 899–922, 2023. DOI: 10.1590/2236-9996.2023-5806. Disponível em: revistas.pucsp.br/index.php/metropole/article/view/60214. Acesso em: 26 set. 2025.

ESRI. *GIS for Science: Applying Mapping and Spatial Analytics*. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2020.

FERNANDEZ-DIAZ, J. C.; CARTER, W. E.; SHRESTHA, R. L.; GLENNIE, C. L. Now You See It... Now You Don't: Understanding Airborne Mapping LiDAR Collection and Data Product Generation for Archaeological Research in Mesoamerica. *Remote Sensing*, v. 6, n. 10, p. 9951–10001, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs6109951>.

FONSECA, Murilo Noli da; GARCÍAS, Carlos Mello; SILVA, Luciene Pimentel da. Sistema de alerta de desastre baseado no CEP: limites e possibilidades. *Cadernos Metrópole*, v. 25, n. 58, p. 923-946, 2023. DOI: 10.1590/2236-9996.2023-5807.

G1. Globo, G1-PE. “Chuva alaga esta es do metrô em Joana Bezerra no Recife,” 2011. Acesso em 19/09/2025: [Chuva alaga esta es do metrô em Joana Bezerra, no Recife | NE1 | G1 GALILEU](#). Mudanças climáticas intensificam temporais em 20% no Nordeste, diz estudo. *Galileu*, 13 jul. 2022. Disponível em: <https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/Meio-Ambiente/noticia/2022/07/mudancas-climaticas-intensificam-temporais-em-20-no-nordeste-diz-estudo.html>. Acesso em: 13 jun. 2025.

GONÇALVES, G.; SANTOS, J.; CORT ES, N. Avalia o da qualidade de modelos digitais de terreno obtidos por LiDAR em ambiente urbano. Universidade de Coimbra, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/294418968_AVALIACAO_DA_QUALIDADE_DE_MODELOS_DIGITAIS_DE_TERRENO_OBTIDOS_POR_LIDAR_EM_AMBIENTE_URBANO_UM_CASO_DE_ESTUDO.

GOODCHILD, M. F. Reimagining the history of GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 32, n. 12, p. 1-20, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1563293>.

GOUVEIA, Renata Laranjeiras; SELVA, Vanice Santiago Fragoso. *Riachos urbanos do Recife: educa o ambiental como ferramenta para a revitaliza o*. Revista Educa o Ambiental em A o, n. 65, 16 set. 2018. Disponível em: <http://www.revistaeca.org/artigo.php?idartigo=3326>. Acesso em: 16 jun. 2025.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. *Relatório de Impactos das Enchentes de 2024*. Porto Alegre: Defesa Civil RS, 2024. Disponível em: <https://www.defesacivil.rs.gov.br>. Acesso em: 11 jun. 2025.

GUPTA, H. V.; KLING, H.; YILMAZ, K. K.; MARTINEZ, G. F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, v. 377, n. 1–2, p. 80–91, 2009. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation: Version 2009/2011*. College Station, TX: Texas Water Resources Institute, TR-406, 2011.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. GNSS — Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Vienna: Springer, 2008. DOI: 10.1007/978-3-211-73017-1.

HUANG, S., Gan, Y., Chen, N., Wang, C., Zhang, X., Li, C., & Horton, D. (2024). Urbanization enhances channel and surface runoff: A quantitative analysis using both physical and empirical models over the Yangtze River basin. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131194>.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 17123-8:2015 — Optics and optical instruments — Field procedures for testing geodetic and surveying instruments — Part 8: GNSS field measurement systems in real-time kinematic (RTK). Geneva: ISO, 2015.

J.A. Marengo, E. Alcantara, A.P. Cunha, M. Seluchi, C.A. Nobre, G. Dolif, D. Goncalves, M. Assis Dias, L.A. Cuartas, F. Bender, A.M. Ramos, J.R. Mantovani, R.C. Alvalá, O.L. Moraes. (2023). “Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness. “, *Weather and Climate Extremes*, Volume 39, 2023, 100545.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information-system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 54, n. 11, p. 1593–1600, 1988.

K.C. Seto, B. Güneralp, & L.R. Hutyrá, Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 109 (40) 16083-16088, <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109> (2012).

KASHYAP, S., & BARMAN, B. (2025). Turbulent flow characteristics over gravel bed channel with submerged vegetation patches. *Physics of Fluids*. <https://doi.org/10.1063/5.0257388>.)

KLING, H.; FUCHS, M.; PAULIN, M. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, v. 424–425, p. 264–277, 2012.

KNOBEN, W. J. M.; FREER, J. E.; WOODS, R. A. Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 23, p. 4323–4333, 2019.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. *Geographic Information Science and Systems*. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2015.

PROJETO MAPBIOMAS. *Cidades crescem mais em áreas de risco a desastres climáticos*. São Paulo: MapBiomias, 31 out. 2023. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2023/10/31/cidades-crescem-mais-em-areas-de-risco-a-desastres-climaticos/>. Acesso em: 25 set. 2025.

MARENGO, José A. Situação atual da redução e gestão de risco de desastres na América Latina e Caribe. Apresentação no encontro “Ciclo de Diálogos – Patrimônio Cultural e Ações Climáticas”, Assunção (Paraguai), 28–29 nov. 2023. São José dos Campos: CEMADEN, 2023. Disponível em: https://sissa.crc-sas.org/wp-content/uploads/2023/12/Dia_1_P10_situacion_desastres_Marengo.pdf. Acesso em: 24 set. 2025.

MARENGO, José A.; DOLIF, Giovanni; CUARTAS, Adriana; CAMARINHA, Pedro; GONÇALVES, Demerval; LUIZ, Rafael; SILVA, Larissa; ALVALÁ, Regina C. S.; SELUCHI, Marcelo E.; MORAES, Osvaldo L.; SOARES, Wagner R.; NOBRE, Carlos A. O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. **Estudos Avançados**, v. 38, n. 112, p. 203-228, 2024. DOI: 10.1590/S0103-4014.202438112.012.

MEIO AMBIENTE – CulturaMix. O histórico de enchentes no Brasil: causas e tragédias. 2013. Disponível em: <https://meioambiente.culturamix.com/desastres-naturais/o-historico-de-enchentes-no-brasil-causas-e-tragedias>. Acesso em: 13 jun. 2025.

MENDES, Simoni. *A construção sócio-cultural dos desastres ambientais em áreas de colonização alemã no sul do Brasil: o caso das enchentes em Blumenau (1850–1957)*. 2012. Dissertação (Mestrado em História) — UFSC, Florianópolis, 2012. Disponível em: repositório UFSC (PDF). Acesso em: 25 set. 2025.

MENDONÇA, Marcos Barreto de; DI GREGORIO, Leandro Torres; ALFRADIQUE, Christine de Oliveira Silva. Diagnóstico e discussão sobre Planos Municipais de Redução de Riscos no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, v. 26, 2023. DOI: 10.1590/1809-4422asoc20210207r1vu202312ao.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. *Atlas de Desastres no Brasil: 2008-2023*. Brasília: MIDR, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br>. Acesso em: 11 jun. 2025.

MIRA, I.; SILVA, M. Mapeamento da suscetibilidade à inundação na bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo - MG. PUC Minas, 2023. Disponível em: <https://periodicos.pucminas.br/geografia/article/download/29949/21119/>.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

MORIASI, D. N.; GITAU, M. W.; PAI, N.; DAGGUPATI, P. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Trans. ASABE* 58(6), 1763–1785. 2015.

MORIASI, D. N.; GITAU, M. W.; PAI, N.; DAGGUPATI, P. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, v. 58, n. 6, p. 1763–1785, 2015.

MOURA, Aline. Seis rios entram em alerta e dois transbordam em Pernambuco; Capibaribe preocupa. *Tribuna Online*, 21 maio 2025. Disponível em: <https://tribunaonline.com.br/pernambuco/cidades/seis-rios-entram-em-alerta-e-dois-transbordam-em-pernambuco-capibaribe-preocupa-241567>. Acesso em: 13 jun. 2025.

MUELLER, D. S.; WAGNER, C. R. Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat. Reston: U.S. Geological Survey, Techniques and Methods 3–A22, 2013. 95 p.

MUTHUSAMY, M. et al. Vegetation roughness in hydraulic modelling: Field data and practical implications. *Advances in Water Resources*, v. 147, p. 103-116, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103816>.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models. Part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). 2021 NOAA NGS Topobathymetric Lidar DEM: Revillagigedo Channel, Southeast Alaska. NOAA Fisheries InPort, 2021. Disponível em: <https://www.fisheries.noaa.gov/inport/item/69901>. Acesso em: 11 set. 2025.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. *Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Theoretical Documentation: Version 2009*. Technical Report TR-406. College Station, TX: Texas Water Resources Institute, 2011. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>. Acesso em: 4 out. 2025.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. *Relatório AR6 – Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade*. Genebra: IPCC, 2023. Disponível em: [1](#). Acesso em: 10 jun. 2025.

PINTOR, Ben Hur; ADOCH, Ketty; ILIE, Codrina Maria. **Camadas no QGIS**. In: **Geodados: uma introdução gentil**. [S. l.]: Escola de Dados (Open Knowledge Brasil), 2022. Disponível em: <https://gis.escoladedados.org/camadas-no-qgis.html>. Acesso em: 18 set. 2025.

PORTAL CBN RECIFE. Rio Capibaribe atinge cota de alerta de inundação no Grande Recife. CBN Recife, 06 fev. 2025. Disponível em: <https://www.cbnrecife.com/artigo/rio-capibaribe-atinge-cota-de-alerta-de-inundacao-no-grande-recife>. Acesso em: 13 jun. 2025.

Powell, M. (2014). Flow resistance in gravel-bed rivers: Progress in research. *Earth-Science Reviews*, 136, 301-338. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2014.06.001>.

PRIOR, E. M.; MICHAELSON, N.; CZUBA, J. A.; PINGEL, T. J.; THOMAS, V. A.; HESSION, W. C. Lidar DEM and computational mesh grid resolutions modify roughness in 2D hydrodynamic models. *Water Resources Research*, v. 60, e2024WR037165, 2024. DOI: 10.1029/2024WR037165.

QUARTAROLI, Carlos Fernando; VICENTE, Luiz Eduardo; ARAÚJO, LS de. Sensoriamento remoto. **Geotecnologias e geoinformação. Brasília, DF: Embrapa**, p. 61-79, 2014.

RAMOS, Felipe Mitchell Campos et al. Impactos das mudanças climáticas na precipitação da Bacia do Rio Tapacurá: aplicações do Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco. 2025.

RENTSCHLER, Jun; Salhab, Melda; Jafino, Bramka Arga. Flood exposure and poverty in 188 countries. *Nature Communications*, v. 13, art. 3525, 28 jun. 2022. DOI: 10.1038/s41467-022-30727-4.

Ribeiro, M. S. M. Desastres naturais no Nordeste do Brasil: aspectos meteorológicos, socio sanitários e populacionais. 2021. 141 f. Tese (Doutorado em Ciências Climáticas) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

SANTA CATARINA. Secretaria Executiva de Integridade e Governança. *Guia de gestão de riscos em políticas públicas*. Florianópolis: SEIG, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/iso-31000-de-2018-gestao-de-riscos-pdf>. Acesso em: 14 jun. 2025.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). SACE – Sistema de Alerta de Eventos Críticos. Brasília: SGB, 2025. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/sace/>. Acesso em: 24 set. 2025.

SILVA, J. R.; ALMEIDA, P. F. Análise dos planos municipais de redução de riscos no Brasil. *SciELO*, 2023. Disponível em: <https://bing.com/search?q=refer%c3%aancia+ABNT+dados+gest%c3%a3o+de+risco+planos+diretores+Brasil>. Acesso em: 14 jun. 2025.

SOUZA, C.M. et. al. “Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine”. *Remote Sensing* 12, 2020.

TENG, J. et al. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, v. 90, p. 201-216, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>.

TUCCI, C. E. (2005). “**Modelos Hidrológicos.**” Carlos E. M. Tucci; Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH. – 2º Ed. Porto Alegre: Editora da UFGS, 2005.

UNITED STATES. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). *An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications*. Charleston: NOAA Coastal Services Center, 2012. Disponível em: arquivo PDF “Lidar-101”. Acesso em: 11 set. 2025.

UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Population Prospects 2024: Summary of Results*. New York: United Nations, 2024. Disponível em: https://population.un.org/wpp/assets/Files/WPP2024_Summary-of-Results.pdf. Acesso em: 25 set. 2025.

UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision – Highlights*. New York: United Nations, 2018. Disponível em: <https://population.un.org/wup/assets/WUP2018-Highlights.pdf>. Acesso em: 25 set. 2025.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. **Avaliação de risco de inundação em área urbana integrando dados Lidar e de vulnerabilidade socioambiental**. UNESP, 2025. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/40ee1f67-eb15-4c88-bb11-896cc9382f30>.

USACE. U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (2002). “HEC-RAS: river analysis system, user’s manual”. Davis: Hydrologic Engineering Center, 2002.

VERÇOSA, Livia Fragoso de Melo, 2019. “Modelagem hidrológica e hidrodinâmica aplicada à avaliação da ocorrência de inundações na cidade de Recife, PE” / Livia Fragoso de Melo Verçosa. - 2019. 114 folhas, il., tab., abr. e sigl.

WMO. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019). Geneva: World Meteorological Organization, 2021. Disponível em: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11079. Acesso em: 12 jun. 2025.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). *Guide to Hydrological Practices. Volume I: Hydrology—From Measurement to Hydrological Information* (WMO-No. 168). 6th ed. Geneva: WMO, 2008. Disponível em: https://unstats.un.org/unsd/envaccounting/waterGuidelines/Material/WMO_Guide_168_Vol_I_en_hydrological_practices.pdf. Acesso em: 4 out. 2025.

World Weather Attribution. Climate change increased heavy rainfall hitting vulnerable communities in Eastern Northeast Brazil. 04 jul. 2022. (Relatório técnico de atribuição do evento de maio/2022 no Nordeste; conclui ≈20% mais intenso).

Wu, C. (2022). Density-driven exchange flow propagating over an array of densified obstacles. *Physics of Fluids*. <https://doi.org/10.1063/5.0120342>.

XAVIER, Diego Ricardo; BARCELLOS, Christovam; FREITAS, Carlos Machado. Eventos climáticos extremos e consequências sobre a saúde: o desastre de 2008 em Santa Catarina segundo diferentes fontes de informação. *Ambiente & Sociedade*, v. 17, n. 4, p. 273–294, 2014.

YAMAZAKI, D.; IKESHIMA, D.; TAWATARI, R.; YAMAGUCHI, T.; O’LOUGHLIN, F.; NEAL, J. C.; SAMPSON, C. C.; KANAE, S.; BATES, P. D. A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*, v. 44, n. 11, p. 5844–5853, 2017. DOI: 10.1002/2017GL072874.

ZETTAM, Amin. **Transfert des nitrates du bassin versant de la Tafna (Nord-Ouest de l’Algérie) vers la mer Méditerranée—approche couplant mesures, modélisation et changement d’échelle vers les grands bassins versants Nord africains**. 2018. Tese de

Doutorado. Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT; Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algérie).