



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO(UFPE)
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS (CTG)
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

BRENO THIERRY CALDAS BEZERRA

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE EVENTO DE INUNDAÇÃO COM AUXÍLIO
DO PCSWMM EM BACIA URBANA DE RECIFE-PE**

Recife - PE

2025

BRENO THIERRY CALDAS BEZERRA

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE EVENTO DE INUNDAÇÃO COM AUXÍLIO
DO PCSWMM EM BACIA URBANA DE RECIFE-PE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Pernambuco (UFPE) como parte dos
requisitos para obtenção de grau de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. PhD. José Roberto Gonçalves De Azevedo.

Coorientadora: Dra. Arivânia Bandeira Rodrigues.

Recife - PE

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Bezerra, Breno Thierry Caldas.

Modelagem hidrodinâmica de evento de inundação com auxílio do PCSWMM em bacia urbana de Recife-PE / Breno Thierry Caldas Bezerra. - Recife, 2025. 89p. : il., tab.

Orientador(a): José Roberto Gonçalves de Azevedo

Coorientador(a): Arivânia Bandeira Rodrigues

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, anexos.

1. Drenagem urbana. 2. Inundação. 3. PE3D. I. Azevedo, José Roberto Gonçalves de. (Orientação). II. Rodrigues, Arivânia Bandeira. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO: – Breno Thierry Caldas Bezerra

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: José Roberto Gonçalves de Azevedo

Coorientadora: Arivânia Bandeira Rodrigues

Examinador 1: Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

Examinador 2: Leidjane Maria Maciel de Oliveira

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

Modelagem Hidrodinâmica de Evento de Inundação com Auxílio do PCSWMM em Bacia Urbana de Recife-PE.

LOCAL: Laboratório de Hidráulica CTG/UFPE.

DATA: 24/04/2025 **HORÁRIO DE INÍCIO:** 9:30 horas.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o candidato foi arguido oralmente pelos membros da banca com **NOTA: 9,3**

1) (X) aprovado(s) (nota $\geq 7,0$), pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo, **$3,0 \leq \text{nota} < 7,0$** , será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

2) () reprovado(s). (nota $< 3,0$)

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, 24 de abril de 2025



Documento assinado digitalmente

JOSE ROBERTO GONCALVES DE AZEVEDO

Data: 24/04/2025 14:39:37-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador:

Coorientador:

Avaliador 1:

Avaliador 2:

Candidato:



Documento assinado digitalmente

LEIDJANE MARIA MACIEL DE OLIVEIRA

Data: 24/04/2025 16:10:41-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



Documento assinado digitalmente

ARIVANIA BANDEIRA RODRIGUES

Data: 24/04/2025 16:24:28-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



Documento assinado digitalmente

JAIME JOAQUIM DA SILVA PEREIRA CABRAL

Data: 29/04/2025 21:02:11-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



Documento assinado digitalmente

BRENO THIERRY CALDAS BEZERRA

Data: 23/05/2025 08:54:32-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coordenação do Curso de Engenharia Civil-Dcivil

Rua Acadêmico Hélio Ramos s/nº. Cidade Universitária. Recife-PE CEP: 50740-530.

Fones: (081)2126.8220/8221 Fone/fax: (081)2126.8219.

BRENO THIERRY CALDAS BEZERRA

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE EVENTO DE INUNDAÇÃO COM AUXÍLIO
DO PCSWMM EM BACIA URBANA DE RECIFE-PE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Pernambuco como parte dos requisitos
para obtenção de grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos/Hidráulica

Orientador: Prof. PhD. José Roberto Gonçalves De
Azevedo.

Coorientadora: Dra. Arivânia Bandeira Rodrigues.

Aprovado em: 24 de abril de 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. PhD. José Roberto Gonçalves De Azevedo (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (Examinador Externo)

Universidade Estadual de Pernambuco

Profa. Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira (Examinadora Interna)

Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda proteção, saúde, bençãos, força e coragem para vencer todos os desafios da graduação, da vida e deste trabalho.

Aos meus pais, Manuella Caldas Cordeiro e Marcio Bezerra da Silva pelo amor incondicional, carinho, exemplo, apoio emocional, financeiro, por estarem comigo nessa longa jornada me apoiando em cada segundo e realizando os meus sonhos.

Ao meu irmão, Heitor Caldas Bezerra por seu amor incondicional, apoio e compreensão.

A minha avó Teresa Caldas Cordeiro por seu amor, carinho e suporte.

As minhas madrinhas, Dona Creusa (*in memoriam*) e Dona Dilma (*in memoriam*), por terem sempre acreditado em mim, por terem sido tão especiais na minha vida e ajudado meus pais a me tornarem quem sou hoje.

Aos demais membros da minha família que estiveram do meu lado nesses anos, me apoiando e aconselhando.

À Arivânia Rodrigues, por ter exercido um papel fundamental nesse trabalho, no meu estágio, e ter acreditado em mim até quando eu mesmo não acreditava. Foi uma excelente coorientadora, me dando conselhos, motivações e inspiração.

Ao professor José Roberto Gonçalves pelas ideias, paciência, indicação ao estágio, por exercer uma excelente orientação neste trabalho e por me inspirar a entrar na área de recursos hídricos na disciplina de Hidráulica.

Aos amigos que fiz pela vida, Brenda Alves, João Victor, Carlos Burgos, João Victor Leocadio, Livia e Vitória Honorato.

Aos amigos que cativei na graduação da UFPE, Kyara, Ludmilla, Mariana, Alice, Lucas Gisele e amigos da graduação na UFPI e UESPI em Teresina-PE, pelo apoio na época.

À empresa *Chewater Computational Hydraulics International* – CHI, pela concessão da licença do software PCSWMM para realização da modelagem deste trabalho.

Ao professor Jaime Joaquim por ter disponibilizado o Drone para o voo sobre a área de estudo e ter aceitado fazer parte da banca desse trabalho.

À professora Leidjane Maria Maciel de Oliveira pela oportunidade de participar do PIBIC, por toda a gentileza, carinho e sempre me incentivar a ser um bom pesquisador.

A todos aqueles que mesmo não citados contribuíram de forma direta ou indireta para que esse sonho fosse realizado.

RESUMO

O desenvolvimento urbano e a intensa impermeabilização do solo nas cidades brasileiras têm alterado significativamente o ciclo hidrológico natural, aumentando a frequência e a intensidade de problemas com inundações e alagamentos. Dessa forma, a presente pesquisa buscou avaliar o desempenho do sistema de drenagem urbana da bacia Avenida 30 de Outubro, localizada no bairro de Jardim São Paulo, Recife-PE, durante um evento chuvoso intenso, utilizando modelagem hidrodinâmica integrada 1D-2D no software PCSWMM. Para isso, foram obtidos dados da rede de drenagem pela Prefeitura do Recife, o uso e ocupação do solo foi avaliado com base no mapa do Projeto MapBiomias (2022), os atributos geomorfológicos foram determinados a partir das informações do Modelo Digital do Terreno (MDT) obtido do programa Pernambuco Tridimensional (PE-3D) e o cálculo de infiltração foi realizado pelo método CN. A simulação estimou vazões máximas variando entre 0,036 m³/s e 0,143 m³/s nas diferentes sub-bacias, com erros de continuidade inferiores a 10%. A comparação entre as lâminas d'água simuladas e as observadas em campo apontou boa calibração do modelo, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,803, índice de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,690 e viés percentual (PBIAS) de -14,8%. A análise 2D permitiu a compreensão espacial do escoamento e auxiliou na identificação de pontos críticos de alagamento, principalmente nas áreas próximas ao riacho 30 de Outubro devido ao efeito de remanso causado pelos níveis elevados do Canal Guarulhos e do Rio Jiquiá. Portanto, este estudo demonstrou a eficácia da análise computacional como ferramenta para o planejamento e gestão de sistemas de drenagem pluvial. Os resultados podem auxiliar na tomada de decisão e gestão dos recursos hídricos da região, assim como, serve como estudo de caso para outras áreas com características similares, onde o crescimento urbano desordenado continua a pressionar os sistemas de drenagem existentes.

Palavras-chave: drenagem urbana; inundação; PE3D.

ABSTRACT

Urban development and the extensive soil sealing in Brazilian cities have significantly altered the natural hydrological cycle, increasing the frequency and intensity of flooding and waterlogging issues. Thus, this study aimed to evaluate the performance of the urban drainage system in the Avenida 30 de Outubro basin, located in the Jardim São Paulo neighborhood of Recife, Pernambuco, during an intense rainfall event, using integrated 1D-2D hydrodynamic modeling in PCSWMM software. To achieve this, drainage network data was obtained from the Recife City Government, land use and occupation were assessed based on the MapBiomass Project (2022) map, geomorphological attributes were determined using the Digital Terrain Model (DTM) from the Pernambuco Tridimensional (PE-3D) program, and infiltration was calculated using the Curve Number (CN) method. The simulation estimated peak flows ranging from 0.036 m³/s to 0.143 m³/s across different sub-basins, with continuity errors below 10%. A comparison between simulated and observed water depths indicated good model calibration, with a Coefficient of Determination (R^2) of 0.803, a Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) of 0.690, and a Percent Bias (PBIAS) of -14.8. The 2D analysis provided a spatial understanding of surface flow and helped identify critical flooding points, particularly in areas near the 30 de Outubro stream, due to backwater effects caused by high water levels in the Guarulhos Canal and Jiquiá River. Therefore, this study demonstrated the effectiveness of computational analysis as a tool for planning and managing stormwater drainage systems. The results can support decision-making and water resource management in the region while also serving as a case study for other areas with similar characteristics, where uncontrolled urban growth continues to strain existing drainage systems.

Keywords: urban drainage; flooding; PE3D.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Influência da urbanização na dinâmica de escoamento e inundações.	20
Figura 2: Sarjeta e canaleta retangular.....	24
Figura 3: Boca de Lobo simples localizada em via urbana.	25
Figura 4: Boca-de-lobo simples.....	25
Figura 5: Boca de Lobo com grelha localizada em via urbana.	26
Figura 6: Boca-de-lobo com grelha.	26
Figura 7: Boca-de-lobo combinada.	26
Figura 8: Boco-de-lobo múltipla.	27
Figura 9: Distribuição dos dispositivos de drenagem em projeto.	28
Figura 10: Poço de Visita próximo a uma Boca de Lobo com grelha.	28
Figura 11: Corte transversal de um poço de visita convencional.	29
Figura 12: Balanço hídrico realizado pelo PCSWMM.....	32
Figura 13: Modelo Conceitual de sistema de drenagem no PCSWMM.	33
Figura 14: Esquematização da modelagem 1D e 2D integrada.....	36
Figura 15: Fluxograma da metodologia do modelo PCSWMM.....	39
Figura 16: Localização da bacia Avenida 30 de Outubro.	40
Figura 17: Mapa Geológico do Recife.	42
Figura 18: Equipamentos e Drone.	44
Figura 19: Ponto de apoio para voo de Drone.	44
Figura 20: Parâmetros de entrada para os elementos de drenagem no modelo PCSWMM.	48
Figura 21: Carro coberto pela água na Rua Aguati, em Jardim São Paulo – 05/02/2025.	50
Figura 22: Alagamento no cruzamento da Rua Leandro Barreto e Rua Lorena, em Jardim São Paulo – 05/02/2025.....	50
Figura 23: Inundação em Posto de Gasolina e rua próximos a Avenida 30 de Outubro – 05/02/2025.....	50
Figura 24: Canal Guarulhos inundado, receptor da vazão do riacho Avenida 30 de Outubro – 05/02/2025.....	51
Figura 25: Hipsometria da bacia Avenida 30 de Outubro.	53
Figura 26: Redução das seções da calha natural para calha artificial do riacho 30 de Outubro.	55
Figura 27: Seção retangular do riacho 30 de Outubro.....	55
Figura 28: Presença de vegetação na calha natural do riacho 30 de Outubro.	56

Figura 29: Lançamento de esgoto e acúmulo de lixo no riacho 30 de Outubro.	56
Figura 30: Presença de obras no riacho sem sinalização e com indicação de irregularidades.	57
Figura 31: Bueiro do riacho 30 de Outubro.	57
Figura 32: Encobrimento do riacho 30 de Outubro.	58
Figura 33: Caixas coletoras obstruídas, com vegetação e danificadas.	59
Figura 34: Bocas de Lobo com Grelha.	59
Figura 35: Rua Dr. Freitas Lins com pontos de erosão e canaletas de drenagem.	60
Figura 36: Canaletas retangulares.	60
Figura 37: Divisão das sub-bacias na Bacia Avenida 30 de Outubro.	61
Figura 38: Definição das áreas permeáveis e impermeáveis na Bacia Avenida 30 de Outubro.	62
Figura 39: Série temporal da chuva de 03/02 a 07/02/2025 no posto Imbiribeira.	64
Figura 40: Hidrogramas das Sub-bacias durante a chuva de 03/02 a 07/02/2025.	65
Figura 41: Distribuição dos pontos de máxima cheia utilizados para calibração.	67
Figura 42: Velocidade do escoamento nos condutos da drenagem.	69
Figura 43: Profundidade do escoamento nos condutos da drenagem.	70
Figura 44: Perfil longitudinal do Riacho “30 de Outubro” no dia 06/02/2025 às 14:00h.	71
Figura 45: Mapa da mancha de inundação com a drenagem para o evento de precipitação intensa em 06/02/2025, às 14:00h.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo das características geomorfométricas da Bacia Avenida 30 de Outubro.	54
Tabela 2: Dados de entrada das sub-bacias do modelo PCSWMM.	62
Tabela 3: Parâmetros de entrada para modelo de infiltração.	63
Tabela 4: Parâmetros determinados para dados de entrada no modelo PCSWMM.	63
Tabela 5: Erros de continuidade para a modelagem hidrológica.	65
Tabela 6: Vazões máximas por sub-bacia para o evento em 05 de fevereiro de 2025.	65
Tabela 7: Infiltração por sub-bacia para o evento em 05 de fevereiro de 2025.	66
Tabela 8: Pontos de calibração levantados em campo.	67
Tabela 9: Coeficientes estatísticos para evento de chuva de 03/02 a 07/02/2025.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
BL	Boca de Lobo
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CHI	Chiwater Computational Hydraulics International
CL	Caixa de Ligação
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
CN	Curve Number
CNM	Confederação Nacional de Municípios
DMAPU	Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
LiDAR	Light Detection and Ranging
LIDs	Low Impact Development
MDT	Modelo Digital do Terreno
MUNIC	Pesquisa de Informações Básicas Municipais
NRCS	Natural Resource Conservation Service
NRCS-Kansas	Natural Resources Conservation Service do Kansas
NSE	Coefficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe
PBIAS	Percent Bias
PCSWMM	Personal Computer Storm Water Management Model
PDDUA	Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental
PV	Poço de Visita
R ²	Coefficiente de Determinação
RMR	Região Metropolitana do Recife
SCS	Soil Conservation Service
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SWMM	Storm Water Management Model
U.S EPA	United States Environmental Protection Agency
USDA	United States Department of Agriculture
ANA	Agência Nacional de Águas
BL	Boca de Lobo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos gerais	15
1.2	Objetivos específicos	15
1.3	Justificativa e motivação	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Desenvolvimento urbano	16
2.2	Inundações e alagamentos	18
2.3	Drenagem urbana.....	21
2.3.1	Dispositivos de drenagem.....	23
2.4	Modelagem Hidrodinâmica	29
2.4.1	<i>Personal Computer Storm Water Management Model – PCSWMM</i>	30
3	METODOLOGIA.....	38
3.1	Bacia hidrográfica Avenida 30 de Outubro	40
3.1.1	Localização e generalidades.....	40
3.1.2	Hidrografia.....	41
3.1.3	Clima.....	41
3.1.4	Geologia	41
3.1.5	Relevo.....	43
3.1.6	Cobertura vegetal	43
3.2	Reconhecimento da área	43
3.3	Dados de entrada para modelo PCSWMM.....	45
3.4	Chuva de projeto.....	49
3.5	Calibração do modelo	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1	Avaliação da área de estudo.....	53
4.1.1	Características geomorfométricas da Bacia Avenida 30 de Outubro.	53
4.1.2	Diagnóstico da rede de drenagem existente.....	54
4.2	Modelagem Hidrológica	61
4.2.1	Definição das áreas permeáveis e impermeáveis.	61
4.2.2	Parâmetros hidrológicos	63
4.3	Modelagem Hidrodinâmica	66
4.3.1	Calibração	66

4.3.2	Escoamento e mancha de inundação	68
5	CONCLUSÕES.....	74
5.1	Recomendações para trabalhos futuros	75
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
	ANEXO A – TABELAS DE COEFICIENTES DE RUGOSIDADE DE MANNING E ARMAZENAMENTO EM DEPRESSÕES.....	84

1 INTRODUÇÃO

A urbanização é um fenômeno que ocorre em dimensões globais, tendo seu crescimento observado a partir da segunda metade do século XX devido a migração da zona rural para as cidades, o que, além de provocar uma maior densidade populacional nas regiões de concentração urbana, traz impactos diretos na infraestrutura de água destes locais (Tucci, 2003).

Dentre as principais problemáticas acerca do manejo das águas urbanas temos, a deficiência de abastecimento de água e saneamento, ausência de drenagem urbana, canalização e estrangulamento de rios, descarte inadequado de resíduos sólidos e esgoto nos corpos hídricos, comprometimento do escoamento superficial por impermeabilização demasiada do solo e ocupação irregular de áreas de enchente dos rios e córregos, chamadas de várzeas inundáveis (Tucci, 2003). De acordo pesquisa da Confederação Nacional de Municípios (CNM), desastres naturais causaram um prejuízo de 639,4 bilhões de reais nos últimos 10 anos, alcançando 418,3 milhões de pessoas impactadas (uma pessoa pode ser atingida por um desastre repetidas vezes), 4,1 milhões desalojadas e 2.667 mortes (CNM, 2023).

De acordo Tucci (2003), o fenômeno de inundação é caracterizado quando o nível de água dos rios e riachos fica acima da cota do seu leito menor e escoar na cota do leito maior, em áreas de cheia moldadas naturalmente pelo curso do corpo hídrico ao longo do tempo, com a ocupação dessa região há o impacto e destruição de moradias, infraestrutura de transportes, comércio e indústria. Já os alagamentos, são o acúmulo de água em pontos vulneráveis devido a insuficiência do sistema de drenagem em esgotar a água precipitada (Cruz et al., 2007).

Tais desastres podem ser provocados por fatores naturais, como o relevo da bacia, capacidade de drenagem do rio, precipitação e cobertura vegetal, ou artificiais, por conta da ocupação irregular das margens do rio, desmatamento, estrangulamento ou obstrução por obras hidráulicas, uso agrícola, entre outros (Tucci, 2003).

Com as mudanças climáticas e o aumento da temperatura global observadas nos últimos anos, os eventos de inundação são intensificados pela modificação nos regimes de precipitação (em intensidade, duração e frequência), causando desastres cada vez mais frequentes e graves, com perda de vidas humanas e prejuízos materiais (Drumond et al., 2023).

Assim, é reconhecido um futuro preocupante no tocante as inundações urbanas devido a tendência do agravamento das mudanças climáticas globais, Araujo et al. (2024) analisaram os efeitos da mudança climática no estado de Pernambuco utilizando modelos *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) e constataram que, de 2041 a 2060 há a previsão de

aumento de 1,64°C a 2,10°C, e um aumento de aproximadamente 5°C até o ano de 2100 na temperatura característica do estado de Pernambuco (Araujo et al., 2024).

Além disso, de acordo o relatório de 2022 do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês), Recife é considerada a 16ª cidade mais vulnerável às mudanças climáticas no mundo devido ao aumento do nível do mar e à sua condição geográfica e topográfica particular. Ainda, segundo o documento de Análise de riscos e vulnerabilidades climáticas e estratégia de adaptação do município do Recife, elaborado pela prefeitura do município em 2019 e publicado em 2022, a cidade conta com uma projeção de aumento no risco de inundações de 68,44% até 2040 (RECIFE, 2019).

Junior (2016) avaliou o sistema de microdrenagem de um ponto crítico de alagamento em um bairro central de Recife-PE e constatou que a infraestrutura de drenagem não acompanhou o processo de urbanização da região, tornando-a ineficiente diante da sobrecarga dos dispositivos hidráulicos existentes e provocando problemas de alagamento. O estudo recomendou a readequação dos poços de visita da rede, limpeza regular das galerias e o controle das vazões de contribuição de fonte com técnicas de drenagem sustentável.

Urge, portanto, a concepção adequada por parte dos profissionais de engenharia e órgãos públicos do planejamento urbano, de forma que englobe não apenas intervenções estruturais, mas uma visão integrada das áreas urbanizadas e dos recursos hídricos, através de soluções que aproximem os problemas enfrentados pelas cidades à drenagem sustentável. Assim como, promova a conscientização da sociedade na preservação dos rios, córregos, e estimule a constante cobrança para a estruturação da sua comunidade com os serviços de drenagem (Tucci, 2005).

O bairro de Jardim São Paulo, em Recife-PE, é uma região de grande relevância para o município e apresente vulnerabilidade a eventos extremos de chuva. Trata-se de uma área com intensa urbanização e predominância de ocupação residencial, cujos habitantes são impactados por problemas de inundações e alagamentos de forma frequente.

O presente estudo baseou-se em resultados obtidos através da aplicação de modelagem hidrológica, utilizando modelos matemáticos que reproduzem o ciclo hidrológico e, dessa forma, observar o comportamento do escoamento superficial em resposta a um evento de chuva. Também, a simulação hidrodinâmica, que pode reproduzir a propagação da vazão ao longo do corpo hídrico (Rodrigues, 2021). Para isso, foi utilizado o *software Personal Computer Storm Water Management Model* (PCSWMM), uma ferramenta avançada de modelagem para a gestão de águas pluviais e escoamento de canais, desenvolvida pela *United States Environmental Protection Agency* (U.S EPA).

Dessa forma, a presente pesquisa almeja ser uma ferramenta de auxílio na tomada de decisão da gestão de drenagem urbana e dos recursos hídricos na bacia “Avenida 30 de Outubro”, no bairro de Jardim São Paulo, sendo necessário o estudo das condições da drenagem para avaliação dos problemas e seus impactos, com o uso da tecnologia da modelagem.

1.1 Objetivos gerais

Este trabalho objetiva realizar a modelagem hidrodinâmica integrada 1D-2D da drenagem urbana na bacia hidrográfica Avenida 30 de Outubro, com auxílio do programa PCSWMM.

1.2 Objetivos específicos

- Calcular os hidrogramas de cheia por meio da modelagem hidrológica no PCSWMM;
- Diagnosticar a infraestrutura de drenagem urbana da bacia;
- Calibrar o modelo a partir da observação de um evento de chuva intensa adotado;
- Obter a mancha de inundação da bacia Avenida 30 de Outubro para um evento de chuva intensa adotado.

1.3 Justificativa e motivação

O bairro de Jardim São Paulo, bem como grande parte do município de Recife, encontra-se em uma posição de vulnerabilidade frente as mudanças climáticas. Anualmente, diversos bairros da Região Metropolitana do Recife (RMR) sofrem crises com inundações e alagamentos. Um dos casos mais graves pode ser exemplificado no mês de maio de 2022, com chuvas de mais de 200 mm em 24h, 130 mortes e 6 mil desabrigados que tiveram que evacuar suas casas, com perdas materiais substanciais (Marengo et al., 2023). Além disso, nota-se a difícil rotina enfrentada pela população que não consegue transitar pela cidade, e sente apreensão de ter suas casas invadidas pela água.

Com isso, destaca-se a importância do estudo de regiões vulneráveis no município, a fim de garantir a efetiva adequação e prevenção a graves cenários como o já relatado e garantir a segurança da população a partir de soluções de drenagem para amenizar os impactos das cheias no ambiente urbano.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Desenvolvimento urbano

Desde o século XVIII observa-se a tendência de migração da população mundial do ambiente rural para as cidades, com efeito associado a revolução industrial ocorrida na Inglaterra. A partir da terceira revolução industrial do meio técnico-científico-informacional, os avanços tecnológicos passaram a transitar entre países proporcionando desenvolvimento nos grandes conglomerados urbanos (Tucci, 2005).

No Brasil, assim como para toda a América Latina, este crescimento se dá a partir do século XX, atrelado a um lento crescimento econômico e alto êxodo para as metrópoles com a concentração das atividades socioeconômicas e administrativas nas grandes cidades. Isto faz com que a expansão urbana se dê de forma desbalanceada, a distribuição dos habitantes nas cidades ocorre de forma espontânea, sendo necessário um projeto de planejamento urbano que venha a mitigar as deficiências de infraestrutura, que tanto impactam a qualidade de vida da população e o meio ambiente (Tucci e Bertoni, 2003).

De acordo o Relatório Mundial das Cidades, publicado pela ONU-Habitat em 2022, 55,7% da população mundial vive em ambiente urbano, com projeção de atingir 68% até 2050, na América Latina, atualmente este número chega a 81%, podendo alcançar 87% até 2050 (UN-HABITAT, 2024).

Complementarmente, é válido ressaltar o conceito de cidade formal e informal, na qual a primeira é composta pela população de renda média a alta que conta com a plenitude dos serviços de drenagem, pavimentação, áreas verdes, educação e lazer, e a outra parcela da população de baixa renda, que sofre a desassistência do poder público e, portanto, é majoritariamente afetada pelas crises de inundação, alagamentos e escorregamentos de solo (Alencar, 2014).

Diante dos graves problemas ambientais e sociais notados, a discussão acerca da gestão das águas urbanas ganhou destaque e os primeiros conceitos de manejo dos recursos hídricos, projetos e plano de drenagem para as cidades surgiram.

A gestão dos recursos hídricos, por muito tempo, foi um tema negligenciado, devido a ideia de infinitude da água no planeta por apresentar-se em diversas formas, como as chuvas, oceanos, mares e rios. Porém, durante a Conferência Mundial das Nações Unidas sobre Água e Meio Ambiente, ocorrida em Dublin, Escócia, no ano de 1992 estabeleceu-se que, “a água é um

recurso finito e vulnerável, essencial para a manutenção da vida, do desenvolvimento e do meio ambiente”, deste momento em diante observa-se o esforço mundial, ainda que paulatino, na preservação dos recursos hídricos, majoritariamente de água doce. Posteriormente, no Brasil, foi criada a Lei n.9.433, de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e definiu uma estrutura administrativa e jurídica que apoia a gestão das águas com o Sistema Nacional de Recursos Hídricos. Aliado a isto, em maio de 2001, a partir da Lei n.9.984, foi criada a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e a Resolução Conama n.16 que trata de critérios gerais para outorga de direito de uso dos recursos hídricos (BRASIL, 1990; BRASIL, 1997; BRASIL, 2000).

O debate acerca da gestão das águas urbanas deve endossar uma abordagem multisetorial e integradora entre os sistemas de gerenciamento de recursos hídricos e planejamento metropolitano, a partir de estratégias acerca do uso e ocupação do solo. Isto opõe-se a adoção de medidas estruturais seguindo uma lógica predominantemente local apenas, mas contemplando a funcionalidade integrada dos sistemas de drenagem (Silva e Porto, 2003). Dessa forma, é essencial a articulação entre todas as unidades básicas da Federação brasileira, a União, os Estados e Municípios, bem como, a cooperação interinstitucional entre empresas, governos e universidades, na busca por soluções.

Com o crescimento da malha urbana e suas intervenções no meio ambiente, ocorre a alteração do ciclo hidrológico, de acordo Tundisi (2006), o impacto na região é causado principalmente por conta da construção de canais, transposições de água e reservatórios, aumento da erosão e assoreamento de rios, lagos e áreas alagadas, aumento do transporte de água para abastecimento público e uso excessivo das águas subterrâneas.

O que é percebido no cenário atual de urbanização no Brasil é a expansão da malha urbana em detrimento dos corpos hídricos existentes, sendo comum o aterramento ou canalização de rios e canais urbanos para construção de áreas impermeáveis. Esta ação traz consigo dois agravantes: a perda da capacidade de infiltração da água precipitada que passa a escoar superficialmente e é direcionada a drenagem urbana, e o estrangulamento ou “sufocamento” do rio, que deixa de exercer seu fluxo normal e perde as áreas de cheia, invadindo as ruas e edificações próximas (Tucci, 2016).

Outra tendência visualizada no meio urbano é o aumento da temperatura, visto que as superfícies impermeabilizadas absorvem parte da radiação solar incidente, o que aumenta a emissão de radiação térmica de retorno ao ambiente e causa a formação das ilhas de calor nas porções densamente ocupadas das cidades, isto ocasiona também a formação de movimentação de ar ascendente, responsável pela intensificação das chuvas (Tucci, 2016).

A partir disso, diversas problemáticas surgem atreladas a drenagem da água das chuvas. Dos principais problemas identificados nas regiões densamente ocupadas sem planejamento adequado observa-se, a impermeabilização do solo com edificações e ruas, ocupação de áreas de encostas e áreas inundáveis do rio, depósito e acúmulo de lixo nas ruas e nos dispositivos hidráulicos, e a falta de manutenção do sistema de drenagem existente (Tucci, 2016).

É válido ressaltar, também, outra problemática advinda da falta de planejamento urbano, as obstruções dos dispositivos de drenagem e assoreamento dos corpos hídricos. Construções civis no geral, a limpeza de terrenos e a presença de áreas degradadas são fatores que atenuam a geração de sedimentos em uma bacia, efeito da erosão sobre as superfícies desprotegidas, o carregamento deste material particulado adentra o sistema de drenagem e pode causar a obstrução de pontos vulneráveis, reduzindo sua capacidade de escoamento e o assoreamento do fundo de corpos hídricos. Além disso, o lixo presente nas ruas sem a coleta adequada pode ser transportado para as estruturas hidráulicas causando a obstrução dos sistemas de drenagem, é comum encontrar objetos que causam perplexidade como: sofás, colchões, eletrodomésticos e entulho (Tucci, 2005).

Análogo a este cenário, destaca-se o lançamento de poluentes no sistema de drenagem pluvial, uma vez que, em um contexto de expansão desordenada não há a separação entre os sistemas de esgotamento sanitário e drenagem pluvial, dessa forma, são encontrados sedimentos, nutrientes, metais pesados, derivados de petróleo e agentes patogênicos na água direcionada para a drenagem pluvial. A qualidade ruim desta água provoca a poluição dos aquíferos, rios e córregos urbanos, e depende de fatores como a frequência de limpeza urbana e adequada instalação do sistema de esgotamento de efluentes (Tucci, 2005).

2.2 Inundações e alagamentos

Com a intensificação da urbanização e crescente impermeabilização do solo, há o aumento do volume pluvial escoado e redução do amortecimento, provocando o aumento das vazões máximas que podem representar seis vezes a vazão de pré-urbanização (Cruz et al., 2020; Tucci, 2016).

A origem das inundações urbanas está intimamente atrelada a forma que ocorre a expansão das cidades no Brasil. De acordo Tucci (2005), em primeira instância a bacia é parcialmente ocupada e densifica-se a jusante, a partir da impermeabilização e canalização da região, há a alteração do hidrograma com aumento e ampliação do pico de cheia a jusante, com isso, os locais de seção e declividade insuficiente provocam inundações. A posteriori, realiza-

se o alargamento das seções e a cidade se desenvolve para montante, repetem-se os processos descritos anteriormente e há o aumento das vazões máximas e volumes em novas inundações o que, novamente, demanda a correção das seções da drenagem. Entretanto, em um cenário de expansão urbana consolidada, já não há espaço para ampliações laterais, o que implica em soluções de alto custo para aprofundamento dos canais.

Um hidrograma é a forma gráfica de representar a vazão medida na saída da bacia hidrográfica (exutório) resultante de uma chuva efetiva e sua relação com o tempo de concentração, que representa o intervalo de tempo necessário para que a água escoe desde o ponto mais remoto da bacia até o momento que atinge o exutório (Collischonn et al. 2015).

Choudhury et al. (2004) classificam as inundações em fluvial (River Flood), brusca (Flash Flood) e costeira. A Inundação fluvial, ou enchente, ocorre no momento em que há o extravasamento da margem do rio pelo fluxo de escoamento, desenvolvem-se a partir de chuvas de baixas precipitações e prolongadas, neste tipo de evento, há a saturação lenta do solo e, portanto, diminuição da sua capacidade de infiltração ao ponto de elevar o nível do rio até ocupar as planícies de inundação (Choudhury et al., 2004; Oliveira e Oliveira, 2016; Goerl e Kobiyama, 2005).

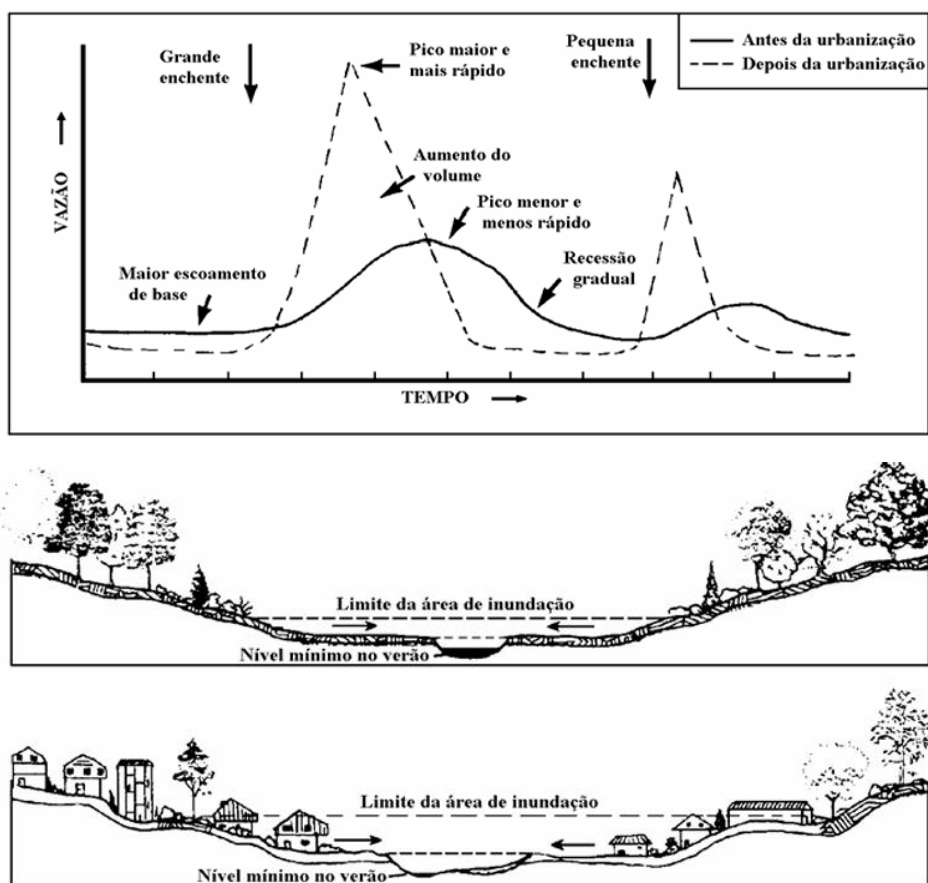
Já a inundação brusca, também chamada de enxurrada, trata-se da elevação do nível de água por conta de um escoamento acelerado e súbito, causando a insuficiência da vazão comportada pelo rio ou canal, durante um evento de chuvas convectivas, intensas e concentradas. Possuem alto potencial destrutivo por intercorrer de forma rápida e possuem grande frequência de ocorrência. A inundação costeira refere-se à elevação do nível do mar ao ponto de invadir locais da cidade (Choudhury et al. 2004; Oliveira e Oliveira, 2016; Goerl e Kobiyama, 2005).

Chuvas convectivas ocorrem pelo aquecimento de massas de ar por contato direto com a superfície quente dos continentes e oceanos, com a elevação das formações de ar para níveis atmosféricos de baixa temperatura ocorre a condensação do vapor formando nuvens verticais de precipitação intensa e de curta duração, em áreas relativamente pequenas (Collischonn et al. 2015).

As mudanças no ciclo hidrológico típicas do meio urbano impactam na ocorrência inundações e alagamentos, assim, há a redução da infiltração no solo, posteriormente, com o direcionamento do fluxo para a canalização há o aumento da velocidade do escoamento superficial, o que provoca o aumento e a antecipação do pico da vazão máxima da bacia, apresentado na Figura 1 (Tucci, 2005). Em virtude da retirada de vegetação para instalação de áreas impermeáveis, há a redução da evapotranspiração, fenômeno que retorna parte do

precipitado para a atmosfera através da evaporação da água do solo e transpiração da vegetação (Collischonn et al., 2015).

Figura 1: Influência da urbanização na dinâmica de escoamento e inundações.



Fonte: Schueler (1987).

Um dos maiores desastres de inundações no Brasil ocorreu no ano de 2024 no Rio Grande do Sul, segundo o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), foram registrados 9 dias ininterruptos de chuva com acumulados entre 300 e 600 mm entre 29 de abril e 03 de maio de 2024, contexto este que causou grande aumento nos níveis do Lago Guaíba e seus afluentes, invadindo a capital Porto Alegre e diversos outros municípios no estado do Rio Grande do Sul. De acordo dados divulgados pela Defesa Civil, 476 municípios foram atingidos, mais de 2,3 milhões de pessoas foram impactadas, mais de 572 mil pessoas foram desalojadas e 183 morreram (Marengo et al., 2024).

Dentre os graves exemplos de inundações em Pernambuco destaca-se a ocorrida em junho de 2010, diversos municípios da Zona da Mata Sul Pernambucana foram atingidos por um evento extremo 180 milímetros de chuva acumulados em 24h. Dentre eles Palmares-PE,

uma cidade de 54.584 habitantes (IBGE, 2024) que foi coberta pelas águas do rio Una, o qual margeava a cidade. O desastre foi marcado por sua imprevisibilidade e violência provocando danos materiais e perdas de vidas em grande escala (Da Silva et al., 2016).

Os alagamentos, diferente das inundações, ocorrem a partir da insuficiência do sistema de drenagem em captar a água precipitada por falta de capacidade ou obstrução dos dispositivos, o que acarreta o acúmulo e extravasamento da água nas vias. No Brasil, os sistemas de drenagem das cidades brasileiras são majoritariamente do tipo combinado, ou seja, recebem contribuição de esgoto local domiciliar além das águas pluviais, o que agrega aos alagamentos um agravante: prejuízos a saúde pública. (Cruz et al., 2007).

Silva et al. (2024) realizaram um levantamento dos serviços de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas em diversas cidades do Brasil e como é a gestão de inundações ribeirinhas e urbanas nesses locais. Foi observado que, para municípios menores, os problemas de inundações tendem a ser menos graves quanto aos alagamentos na drenagem devido à baixa densidade na ocupação do solo, já municípios maiores, com mais de mil habitantes, apresentaram maior ocorrência de eventos graves de inundação devido os poucos espaços para amortecimento da vazão.

2.3 Drenagem urbana

A drenagem urbana é o serviço que, através de um sistema de equipamentos, exerce a função primordial de direcionar a água que, sob qualquer forma, atinge o solo urbano, captando-a e conduzindo-a para locais que assegurem a segurança e durabilidade de uma via (Cruz, 2020). O sistema de drenagem deve priorizar o uso de dispositivos de transporte superficiais, harmonizados à paisagem urbana, ao invés de dispositivos subterrâneos. Assim como, onde for viável, evitar a retificação, canalização e tamponamento dos cursos de água urbanos.

O sistema de drenagem urbana deve ser cuidadosamente planejado e projetado para evitar enchentes, inundações, degradação da malha viária e outros prejuízos à população e à infraestrutura urbana. É fundamental respeitar os limites de velocidade de escoamento para prevenir enxurradas, além de prever a instalação de dispositivos que minimizem o carreamento de sólidos para as galerias subterrâneas. Entre as infraestruturas envolvidas destacam-se o transporte de águas pluviais urbanas, dispositivos de detenção ou retenção para amortecimento de cheias, bem como sistemas de tratamento e disposição final dessas águas (ANA, 2024).

O escopo das atividades do serviço de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas (DMAPU) inclui o planejamento integrado com outros sistemas, como o de abastecimento de

água, esgotamento sanitário e limpeza urbana, além da execução de obras, operação, manutenção e gestão administrativa. A ausência ou má prestação desses serviços pode resultar em alagamentos, acidentes, obstruções do sistema, assoreamento e poluição dos corpos hídricos, danos às moradias, processos erosivos, prejuízos ao comércio, interrupções de serviços, perdas econômicas, dificuldades de mobilidade e desvalorização imobiliária (ANA, 2024).

O gerenciamento da drenagem urbana faz parte do gerenciamento do espaço urbano (Cruz, 2007). Tucci (2016) ao avaliar a regulamentação da drenagem urbana no Brasil, apontou que existem dois níveis de regulação para a drenagem urbana: a regulação em escalas federal, estadual ou municipal, incluindo instrumentos como os Planos de Bacias Hidrográficas e a regulação local, voltada aos impactos específicos dentro do perímetro urbano. Também, percebe-se a dispersão de iniciativas acerca da gestão da drenagem urbana em diversas cidades pelo país, sendo necessária a abordagem ampla do tema de forma que agregue a regulamentação efetiva e sustentabilidade da drenagem urbana.

A Lei federal 11.445/2007 estabeleceu diretrizes básicas para o saneamento básico no Brasil, a partir de um Plano de Saneamento Básico previsto, com inclusão de um Plano de Drenagem Urbana para os municípios (BRASIL, 2007; Tucci, 2016). A atualização dessa legislação ocorreu por meio da Lei nº 14.026/2020, conhecida como o Novo Marco Legal do Saneamento, que reforçou a necessidade de integração entre os componentes do saneamento, ampliou as exigências quanto à universalização dos serviços até 2033 e atribuiu à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) a competência para editar normas de referência regulatórias para os serviços de saneamento, incluindo a drenagem e manejo das águas pluviais urbanas (BRASIL, 2020).

Já o município de Recife-PE, conta com um sistema natural de drenagem que envolve um conjunto bacias hidrográficas as quais, através dos rios Capibaribe, Beberibe e Tejió, desembocam em um estuário comum. Atualmente o sistema de drenagem do Recife é formado por 95 canais principais, que compõem as redes naturais de drenagem das bacias dos rios Beberibe, Capibaribe, Jiquiá, Jordão, Tejió e Jaboatão. Complementarmente, o município apresenta cerca de 1.500 km de extensão de galerias e canaletas registradas (EMLURB, 2013).

O município de Recife-PE é acometido com uma alta frequência de chuvas intensas, cheias do rio Capibaribe, Beberibe e Tejió, a subsidência do solo, um elevado lençol freático em sua planície e a elevação do nível do mar, fatores que provocam uma vulnerabilidade generalizada na cidade. Para adequada compreensão dos processos, gestão e elaboração de

projetos, a drenagem urbana é dividida em Macro drenagem e Micro drenagem (EMLURB, 2013).

A Macro drenagem trata-se do sistema de drenagem que escoar pelos principais talvegues, fundos de vale e cursos d'água da bacia, formando fluxos em proporções maiores por ser o escoadouro natural das águas pluviais. Este sistema deve ser projetado para receber precipitações maiores e com mais volume prevenindo prejuízos materiais e humanos (Oliveira e Oliveira, 2016; Tucci et al., 2003).

Rodrigues et al. (2021) avaliaram os impactos no sistema de macro drenagem do Canal Santa Maria na cidade de Aracaju-SE, e constataram que, devido a expansão urbana irregular na bacia de contribuição, há a heterogeneidade quanto ao grau de impermeabilização da superfície entre as sub-bacias, com isso, pode ser registrado a tendência de aumento em até cinco vezes no volume escoado por áreas com ocupação consolidada e alto grau de impermeabilização, o que provocaria a insuficiência da capacidade de escoamento do canal em um cenário futuro.

Já a Micro drenagem corresponde a parte do sistema que é definida pelo uso e ocupação do solo, contempla os dispositivos hidráulicos receptores da vazão das áreas de contribuição (lotes) resultante de precipitações com risco baixo ou moderado, e conduzem para as galerias ou canais urbanos, como por exemplo: canaletas, meios-fios, sarjetas, bocas-de-lobo, caixas coletoras, caixas de ligação, poços de visita (Oliveira e Oliveira, 2016; Tucci et al., 2003).

Santos et al. (2017) realizaram a análise integrada da dinâmica do sistema de micro drenagem e uso do solo nos bairros Catolé e Sandra Cavalcante, em Campina Grande-PB, mediante simulação hidrológica através do SWMM e observação dos mapas de inundação. O município contou com um aumento aproximado de 307 mil para mais de 400 mil habitantes, o que causou intensa ocupação do solo nos bairros mencionados, que passaram de 26,5% de área impermeável em 1982 para 57% em 2014. Foi destacada, a revisão do sistema de micro drenagem associada a manutenção preventiva para atenuação dos alagamentos da região por falha no sistema de drenagem em períodos chuvosos.

Com isso, faz-se necessária a compreensão do funcionamento dos dispositivos que compõem a rede de drenagem, a serem detalhados no item subsequente.

2.3.1 Dispositivos de drenagem

Os dispositivos de drenagem urbana são equipamentos projetados para receber as águas precipitadas sobre os lotes urbanos e são distribuídos pelas ruas de forma a direcionar o fluxo

de escoamento como é feito naturalmente por rios e canais intermitentes. Dessa forma, configura-se um cenário de hidrografia artificial, no qual a dinâmica de escoamento é dita pelas ruas e canais, instalados pela atividade antrópica, não mais pela natureza (Oliveira e Oliveira, 2016).

De antemão, é válido considerar que o maior dispositivo de drenagem em uma cidade é a rua, pois antes de qualquer outro equipamento, é na rua que há o contato com as vazões produzidas pelos lotes e em uma inundação, sua intransitividade pode comprometer a vida e a rotina da população, com isso devem apresentar uma capacidade de escoamento a prezar pela vida e segurança no trânsito de pessoas, preservação dos bens materiais e meio ambiente (Oliveira e Oliveira, 2016; Canholi, 2005).

O entendimento das vias urbanas aplica-se na distribuição e determinação dos dispositivos de drenagem. De acordo Oliveira e Oliveira (2016) e Cardoso (2008) dentre os dispositivos de drenagem, os principais são:

- Sarjetas:

Canais de seção comumente transversal triangular, posicionados lateralmente as ruas entre o leito viário e as calçadas (passeios), coletam as águas do escoamento superficial e direcionam as caixas coletoras. São limitadas verticalmente pelo meio fio das calçadas, mas podem ser constituídas de peças pré-moldadas (paralelepípedos), chamadas de linhas d'água. Conforme apresentado na Figura 2 (Oliveira e Oliveira, 2016; Cardoso, 2008).

Figura 2: Sarjeta e canaleta retangular.



Fonte: O Autor (2025).

- Caixas coletoras ou Bocas de Lobo;

São as entradas para o sistema de galerias da drenagem, as bocas de lobo captam as águas pluviais que escoam pelas sarjetas e direcionam para as galerias e tubulações

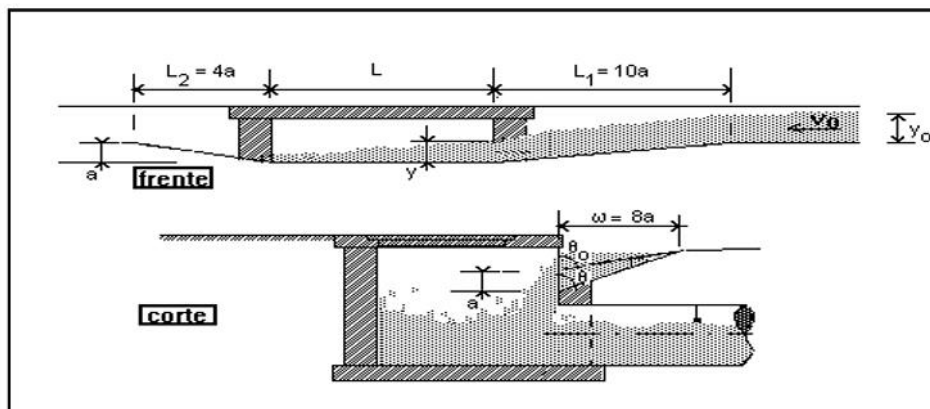
subterrâneas, localizam-se paralelamente na rua e devem ser instaladas no ponto onde é atingido limite de capacidade de escoamento da rua. As Bocas de lobo simples, possuem uma única entrada de coleta das águas, posicionada na guia e abertura na vertical (Figura 3). As guias são depressões próximas as entradas do dispositivo coletor afim de direcionar o fluxo de escoamento diretamente para a seção de entrada (Figura 4) (Oliveira e Oliveira, 2016; Cardoso, 2008).

Figura 3: Boca de Lobo simples localizada em via urbana.



Fonte: O Autor (2025).

Figura 4: Boca-de-lobo simples.



Fonte: Oliveira e Oliveira (2016).

- Boca de lobo com grelha;

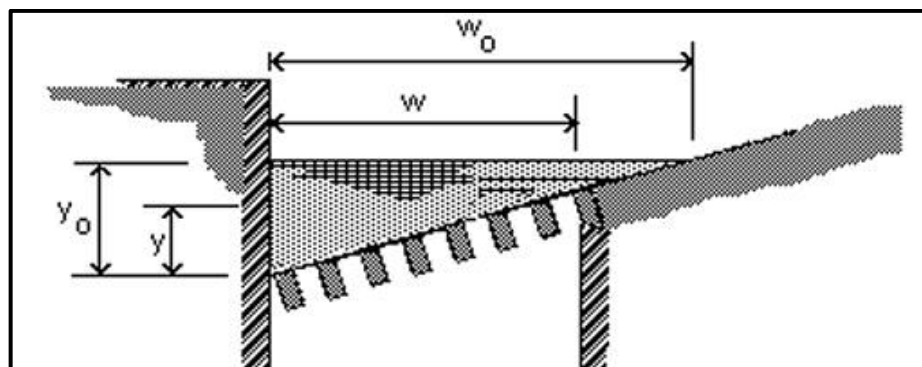
Possuem abertura na horizontal e contam com grelha que possui a função de proteção e segurança de pedestres, ciclistas e veículos. A grelha auxilia também na contenção de resíduos de lixo de grandes dimensões presentes na rua que são carregados pelo escoamento superficial, como plásticos, papeis e peças de madeira que podem causar a obstrução interna das galerias. Como representado na Figura 5 e Figura 6 (Oliveira e Oliveira, 2016; Cardoso, 2008).

Figura 5: Boca de Lobo com grelha localizada em via urbana.



Fonte: O Autor (2025).

Figura 6: Boca-de-lobo com grelha.

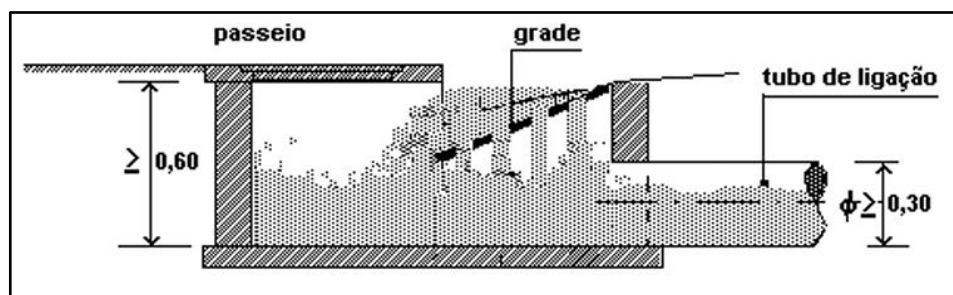


Fonte: Oliveira e Oliveira (2016).

- Boca de lobo combinada;

São caixas coletoras que apresentam características combinadas das caixas de guia simples e com grelha, apresentado na Figura 7.

Figura 7: Boca-de-lobo combinada.

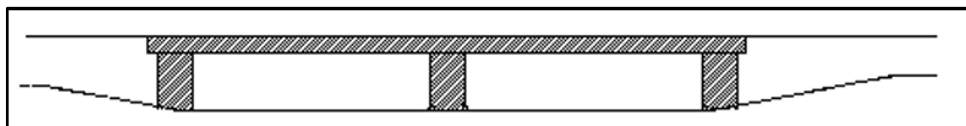


Fonte: Oliveira e Oliveira (2016).

- Boca de lobo múltipla;

Tratam-se de caixas coletoras posicionadas e dimensionadas em conjunto e em sequência com a finalidade de aumentar a capacidade de captação das águas superficiais (Figura 8).

Figura 8: Boco-de-lobo múltipla.



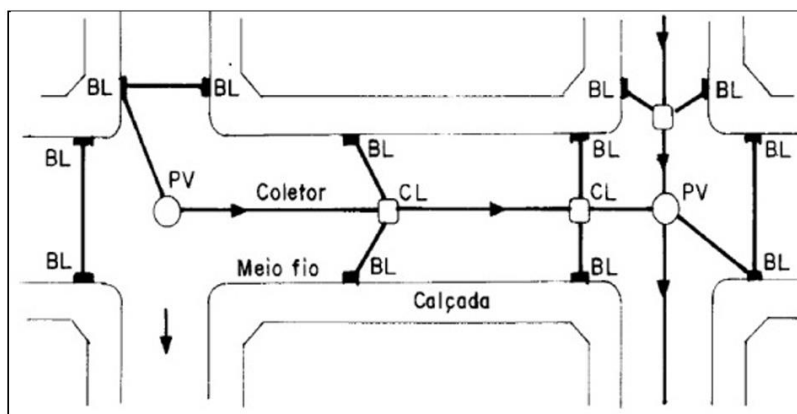
Fonte: Oliveira e Oliveira (2016).

De modo geral, as bocas de lobo devem ser instaladas nos pontos mais baixos das sarjetas. Não se recomenda o posicionamento das caixas coletoras nas esquinas para que os pedestres não corram o risco de transitar em pontos onde a descarga superficial é máxima e em determinados momentos são formadas áreas de alagamentos até que o sistema de drenagem absorva toda a água. Os demais tipos de caixas coletoras são dependentes de fatores como a vazão de projeto, possibilidade de obstruções e interferências no tráfego de veículos e pedestres (Oliveira e Oliveira, 2016).

Em face a possibilidade de obstrução das bocas de lobo, recomenda-se a instalação do dispositivo com grelha e constante acompanhamento e majoração da vazão de projeto afim de considerar a perda de vazão causada pelo bloqueio da seção de entrada. É importante que as caixas coletoras tenham capacidade para interceptar de 90 a 95% da vazão projetada para as sarjetas, de modo que a parcela residual de vazão deixada para jusante seja compatível com o aporte do restante do sistema de drenagem (Oliveira e Oliveira, 2016).

A Figura 9 apresenta um esquema de distribuição de dispositivos de drenagem em vias urbanas, é possível visualizar as Bocas de Lobo (BL) posicionadas lateralmente ao eixo de tráfego, próximos aos cruzamentos e pontos intermediários das vias, conectadas aos Poços de Visitas (PV) e Caixas de Ligação (CL) que representam as galerias subterrâneas, posteriormente com direcionamento ao sistema de macrodrenagem.

Figura 9: Distribuição dos dispositivos de drenagem em projeto.



Fonte: Oliveira e Oliveira (2016).

- Poços de Visita;

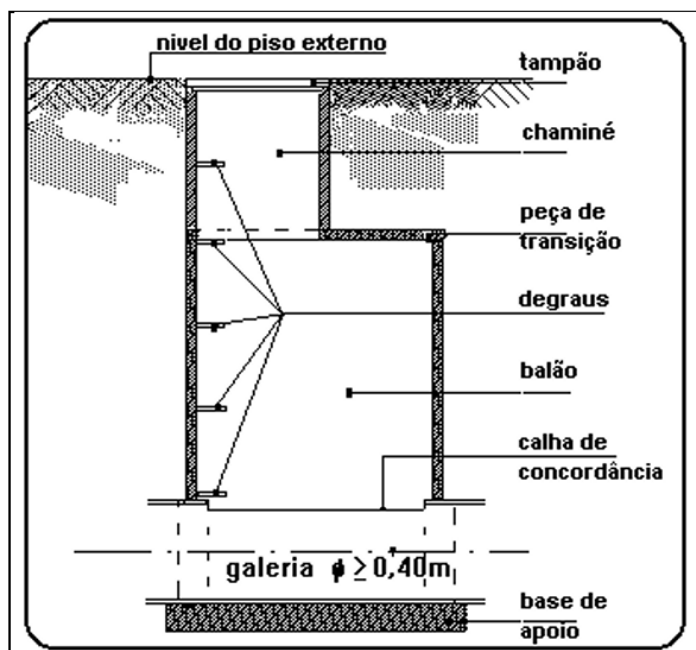
Dispositivos que permitem mudanças de direção, declividade, inspeção e manutenção do sistema de drenagem (Figura 10). Bem como, possibilitam a convergência de diversos condutos em um conduto de diâmetro maior, ou quaisquer outra característica geométrica desejável. Um poço de visita convencional é constituído de dois compartimentos, a chaminé e o balão que permitem a entrada e saída do operador para inspeção e manutenção do interior da galeria (Figura 11) (Oliveira e Oliveira, 2016).

Figura 10: Poço de Visita próximo a uma Boca de Lobo com grelha.



Fonte: O Autor (2025).

Figura 11: Corte transversal de um poço de visita convencional.



Fonte: Oliveira e Oliveira (2016).

- Caixas de ligação ou passagem;

São dispositivos que proporcionam a convergência de condutos advindos de bocas-de-lobo intermediárias ou de modo a evitar a chegada em um mesmo PV de mais de quatro tubulações, diferenciam-se dos PV pois não apresentam entradas para visita.

2.4 Modelagem Hidrodinâmica

Modelo é uma representação simplificada da realidade que pode ser utilizado para a obtenção de conhecimento, realização de previsões, controle, análises, síntese e instrumentação (Haefner, 1996).

Os modelos computacionais têm capacidade de fornecer informações importantes para a tomada de decisão no gerenciamento dos recursos hídricos. A partir deles é possível compreender tanto o comportamento hidrológico da bacia quanto o hidráulico da rede de drenagem, de forma a simular eventos em que a avaliação dos resultados ampare a escolha de alternativas de adequação e solução de problemas (Tucci, 2005).

Modelos de drenagem urbana associam modelos de chuva-vazão com modelos hidráulicos, estes por sua vez, classificados em modelos de armazenamento, considerando a retenção e amortecimento da cheia e modelos hidrodinâmicos para descrever o comportamento do escoamento ao longo de canais ou galerias (Ceolin et al., 2023). Na drenagem urbana, a

aplicação de modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão busca principalmente a representação do escoamento de uma precipitação ao longo da superfície do terreno, bem como, as perdas por interceptação, infiltração, percolação e águas subterrâneas, evapotranspiração e a interação dos processos hidrológicos com a rede de drenagem (Rodrigues, 2021; Ceolin et al., 2023).

Atualmente, os modelos trabalham na representação de uma bacia hidrográfica a partir da sua discretização em subdivisões. Assim como, são necessários dados de entrada, como precipitação, evapotranspiração potencial e parâmetros físicos da bacia que transmitam as características naturais do uso do solo para o modelo. Porém, nem sempre é possível determinar os parâmetros em campo, dessa forma utiliza-se métodos empíricos para obtenção dos dados para calibrar e aproximar o modelo o máximo possível da realidade (Rodrigues, 2021; Ceolin et al., 2023).

O processo de calibração é fundamental para obtenção de um modelo com boa acurácia. Trata-se do procedimento que identifica um conjunto de parâmetros capazes de reproduzir no modelo cenários fêis a realidade, caso não seja realizada a calibração, os modelos podem fornecer resultados errôneos, este ajuste é feito com a comparação dos resultados simulados com os observados em campo. A calibração pode ser realizada manualmente, por tentativa e erro ou de forma automática utilizando ferramentas do próprio *software* (Ceolin et al., 2023).

2.4.1 *Personal Computer Storm Water Management Model – PCSWMM*

O SWMM é um programa desenvolvido pela Agência de Proteção ao Meio Ambiente dos Estados Unidos U.S EPA no ano de 1971 e atualmente encontra-se na sua versão 5. Trata-se de um modelo dinâmico de simulação de chuva-vazão usado para simulação de eventos únicos ou contínuos de chuva, determinação da quantidade e qualidade do escoamento em áreas urbanas. (Rossman et al., 2022). De acordo o Manual do Usuário do SWMM Versão 5.2 (Rossman et al., 2022), entre as aplicações típicas estão:

- Projeto e dimensionamento de sistemas de drenagem urbana para controle de inundações;
- Dimensionamento de reservatórios de retenção e estruturas complementares para controle de cheias e preservação da qualidade hídrica;
- Delimitação de áreas inundáveis em sistemas fluviais naturais;
- Análise da relação precipitação-infiltração e seus impactos no transbordamento de sistemas de drenagem e esgotamento sanitário;

- Avaliação de cargas poluentes difusas em bacias urbanas;
- Avaliação de desempenho de LIDs na mitigação de inundações e redução de poluentes.

O PCSWMM é um *software* que usa como algoritmo de base o SWMM, desenvolvido pela *Chiwater Computational Hydraulics International* (CHI). Possui uma interface amigável com facilidades para explorar recursos como modelagem 2D e identificação de imagens georreferenciadas. O *software* é uma integração entre o Sistema de Informações Geográficas (SIG) com o SWMM e fornece ferramentas abrangentes para modelagem hidrológica, hidráulica e qualidade da água, tais como: modelagem de corpos hídricos, análise de controle em tempo real, suporte a Modelo Digital do Terreno (MDT), suporte ao SIG, relatórios automatizados, manchas de inundação e visualização do Google Earth (Rossman et al., 2022).

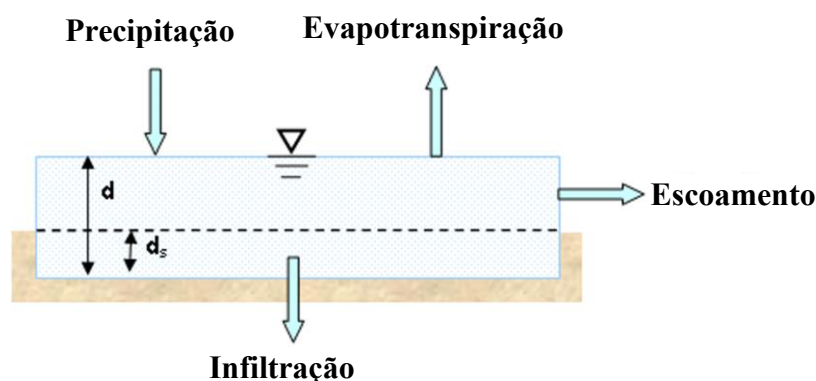
De acordo Rossman et al. (2022), o modelo conceitua o sistema de drenagem como uma série de fluxo de águas entre quatro compartimentos ambientais:

- Atmosférico: gera a precipitação e deposita os poluentes na superfície, tem como entrada os dados das precipitações;
- Superfície do Solo: representado por uma ou mais sub-bacias. Recebe a precipitação do compartimento atmosférico na forma de chuva e retorna os dados em forma de infiltração para o compartimento das águas subterrâneas, e para o compartimento de transporte como escoamento superficial e carga de poluente;
- Águas Subterrâneas: recebe a infiltração do compartimento da superfície do solo e transfere parte dessa infiltração para o compartimento de transporte, em que é modelado como aquífero;
- Transporte: contém uma rede de elementos de transporte e unidades de armazenamento ou tratamento que transportam a água para o exutório ou estações de tratamento.

No decorrer da simulação de um evento, o PCSWMM realiza o balanço hídrico, obtendo a parcela de água retornada a atmosfera pela evapotranspiração, o que infiltra e fica retido ao longo das camadas do solo, e o volume que escoam superficialmente, conforme a

Figura 12. Ainda, para as análises 2D o programa interpreta os caminhos preferenciais do fluxo de escoamento e, quando for o caso, representa os pontos de acúmulo em manchas de inundação.

Figura 12: Balanço hídrico realizado pelo PCSWMM.



Fonte: Rossman et al. (2022).

Segundo o Manual do Usuário do SWMM (Rossman *et al*, 2022), dentre os parâmetros de entrada para o modelo estão os dados de clima (série de dados das precipitações), atributos geométricos da bacia hidrográfica (área, largura e declividade) e atributos físicos da bacia hidrográfica (impermeabilidade, armazenamento em depressão, coeficiente de rugosidade de Manning e parâmetros de infiltração).

No PCSWMM, o sistema de drenagem é representado por um conjunto padrão de elementos ou objetos de modelagem, sendo os principais utilizados para modelar o processo de chuva-vazão os pluviômetros e sub-bacias. O transporte no sistema de drenagem é modelado com uma rede de nós considerados como Poços de Visita (*Junctions*) conectados por condutos (*Conduits*). Em cada conduto, o nó de entrada é chamado de *Inlet* e o nó de saída é chamado de *Outlet*, já para as sub-bacias, é determinado um ponto exutório (*Outfall*). A relação de elementos de modelagem disponibilizado pelo PCSWMM é apresentada no Quadro 1 (Rossman et al., 2016; Rossman *et al*, 2022).

Quadro 1: Elementos de modelagem no PCSWMM.

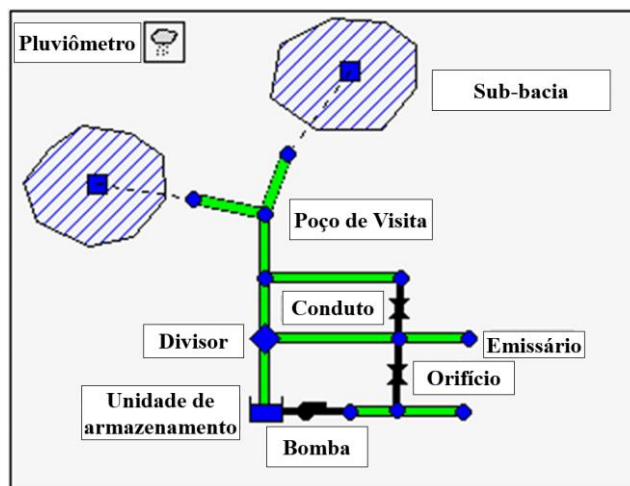
Categoria	Objeto	Descrição
Hidrologia	Pluviômetro (<i>Rain Gage</i>)	Fonte de dados de precipitação para uma ou mais sub-bacias.
	Sub-Bacia (<i>Subcatchment</i>)	Uma parcela de terra que recebe precipitação associada a um pluviômetro e gera escoamento que flui para um nó do sistema de drenagem ou para outra sub-bacia.
	Aquífero (<i>Aquifer</i>)	Uma área subterrânea que recebe infiltração da sub-bacia acima dela e troca o fluxo de água subterrânea com um nó do sistema de transporte.
	Neve (<i>Snow Pack</i>)	Neve acumulada que cobre uma sub-bacia.

Categoria	Objeto	Descrição
	Hidrografia unitária (<i>Unit Hydrograph</i>)	Uma função de resposta que descreve a quantidade de influxo/infiltração de esgoto gerada ao longo do tempo por unidade de precipitação instantânea.
Hidráulica	Poço de Visita (<i>Junction</i>)	Um ponto no sistema de transporte onde os conduítes se conectam (por exemplo, bueiros, conexões de tubos ou junções de fluxo).
	Exutório (<i>Outfall</i>)	Um ponto final do sistema de transporte onde a água é descarregada para um receptor (como um córrego receptor ou estação de tratamento) com elevação conhecida da superfície da água.
	Divisor (<i>Divider</i>)	Um ponto no sistema de transporte onde o fluxo de entrada se divide em dois conduítes de saída de acordo com uma relação conhecida.
	Unidade de Armazenamento (<i>Storage Unit</i>)	Uma lagoa, lago, represa ou câmara que fornece armazenamento de água.
	Conduto (<i>Conduit</i>)	Um canal ou tubulação que transporta água de um nó do sistema de transporte para outro.
	Bombeamento (<i>Pump</i>)	Um dispositivo que eleva a cota hidráulica da água.
	Regulador (<i>Regulator</i>)	Um açude, orifício ou saída usado para direcionar e regular o fluxo entre dois nós do sistema de transporte

Fonte: Adaptado de Rossman et al. (2016) e Rossman et al. (2022).

O modelo conceitual no PCSWMM segue uma hierarquia, de acordo o apresentado na Figura 13: o pluviômetro fornece dados de precipitação para uma ou mais sub-bacias, que direcionam o escoamento superficial de forma direta (por elementos de topografia) ou indireta (por poços de visita do sistema de drenagem e seus condutos) até um exutório. Em meio a este sistema podem ser utilizados outros elementos como bombas, divisores de fluxo e orifícios, se necessário (Rossman et al., 2016; Rossman *et al*, 2022).

Figura 13: Modelo Conceitual de sistema de drenagem no PCSWMM.



Fonte: Rossman et al. (2016).

Além disso, destacam-se os seguintes elementos: Uso do Solo (*Land Use*), uma classificação que reúne dados para caracterizar a superfície da terra; Série Temporal (*Time Series*), função que descreve como um dado quantitativo varia com o tempo (a precipitação, vazão, velocidade e elevação da lâmina de água); e Controle LID (*LID Control*) para aplicação de técnicas de drenagem sustentável (Rossman et al., 2016).

A infiltração pode ser calculada por 5 métodos no PCSWMM: método clássico de Horton e sua versão modificada, o método de Green-Ampt e sua versão modificada e o método Curva Número (CN). Nesta pesquisa foi adotado o método de infiltração Curva Número, por se tratar de um modelo de aplicação acessível com apenas um parâmetro necessário, o número CN, e devido a inexistência de dados medidos em campo para aplicação adequada dos métodos de Horton e Green-Ampt (Rossman et al., 2022).

O método CN baseia-se no amplamente utilizado método SCS (*Soil Conservation Service*, atualmente conhecido como NRCS – *Natural Resource Conservation Service*) que agrupa todas as perdas devido à interceptação, armazenamento de depressão e infiltração para prever o excesso total de um evento de chuva, no PCSWMM os parâmetros de entrada para o método são o número CN e o número de dias secos (Rossman et al., 2022).

O cálculo do fluxo de água pode ser realizado por três modelos que utilizam as equações de Saint-Venant, dos princípios de conservação de massa e da quantidade de movimento são estes: fluxo em regime uniforme, onda cinemática e onda dinâmica. Todos esses métodos utilizam a equação de Manning para relacionar vazão com a profundidade e inclinação (Rossman et al., 2022).

O fluxo em regime uniforme assume que a profundidade, a velocidade e a vazão permanecem constantes ao longo do comprimento do canal, sem a propagação de vazões, apenas transfere o hidrograma de entrada no nó *inlet* de montante do conduto para o nó de jusante *outfall*. Também, não leva em conta os efeitos de remanso, perdas de entrada/saída, reversão de fluxo ou fluxo pressurizado (Rossman et al., 2022; Rodrigues, 2021).

O modelo de onda cinemática é uma simplificação das equações de Saint-Venant, utilizadas para descrever o escoamento não permanente em canais. Nesse modelo, a vazão e a área variam no espaço e tempo no interior do conduto, os termos de inércia e pressão são desprezados, considerando-se apenas os efeitos da gravidade e da resistência ao escoamento. Isto pode resultar em amortecimento e defasagem nos hidrogramas de saída com respeito aos hidrogramas de entrada nos condutos. Assim como, não é possível simular os efeitos de ressalto hidráulico, as perdas nas entradas e saídas, fluxo pressurizado e pode não ser adequado para

canais com declividades muito baixas ou onde os efeitos de remanso são importantes (Rossman et al., 2022; Rodrigues, 2021).

O modelo da onda dinâmica utiliza as equações completas unidimensionais de Saint-Venant. É o mais completo e preciso para descrever o escoamento em canais, sendo capaz de representar fenômenos como ondas de cheia e efeitos de remanso. Esta equação resulta da aplicação da equação da continuidade e da quantidade de movimento nos condutos, e da equação da continuidade dos volumes nos nós (Rossman et al., 2022; Rodrigues, 2021).

A forma da equação da continuidade Equação (1) e equação da conservação do movimento Equação (2) utilizada pelo PCSWMM são, respectivamente:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

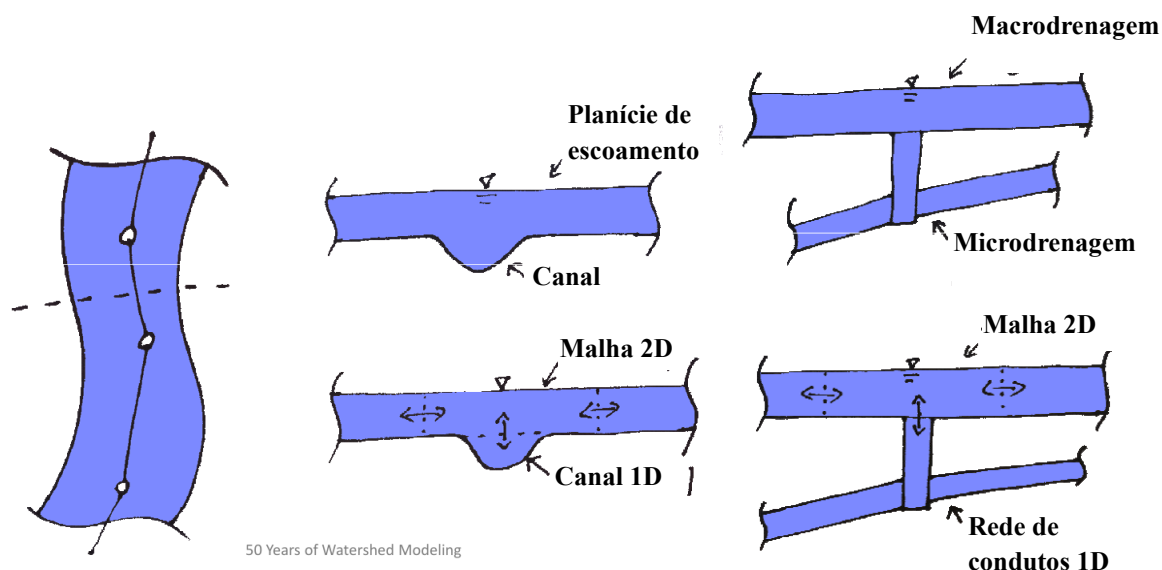
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} gAS_f + gAh_L = 0 \quad (2)$$

Sendo: A a área da seção transversal dos condutos da malha (m^2); t o tempo (s); Q a vazão do conduto da malha (m^3/s); x o comprimento do conduto da malha (m); H a altura hidráulica da água no conduto da malha (m); S_f a inclinação de fricção (m/m); h_L a perda de energia local por unidade de comprimento do conduto (m/m); g a aceleração da gravidade (m/s^2).

O PCSWMM concebe o modelo 2D a partir de nós 2D (*2D Nodes*) que seguem a elevação do terreno, dos quais é criada uma malha de células hexagonais ou retangulares, a elevação média do fundo de cada célula é chamada de elevação invertida (*Invert Elevation*), e a elevação de borda (*Rim Elevation*) referente a elevação do terreno (Bagheri et al., 2020; CHI, 2019; James et al., 2013).

Na modelagem 1D integrada a 2D, o PCSWMM incorpora a profundidade 1D às equações da conservação do movimento para fluidos homogêneos ao longo de cada componente de uma célula computacional. O modelo utiliza de uma rede de poços de visita e condutos representando a hidrografia e topografia do local. A Figura 14 ilustra como é realizada a conexão entre a modelagem 1D com a 2D no PCSWMM.

Figura 14: Esquematisação da modelagem 1D e 2D integrada.



Fonte: James et al. (2013).

Ademais, o PCSWMM fornece a ferramenta de implementação de técnicas LIDs através da inserção de um conjunto de parâmetros que alteram as condições de infiltração da bacia, de forma que seja possível observar a resposta do escoamento a diferentes cenários de uso do solo na área de estudo com aplicação de técnicas como células de biorretenção, jardins de chuva, sistemas de pavimentos permeáveis e valas de infiltração (Rossman et al., 2022).

Mesquita et al. (2024) realizaram modelagem integrada 1D e 2D no PCSWMM para estudar diferentes cenários de divisão da macro bacia no setor “O” em Brasília-DF em sub-bacias menores com diferentes pontos de descarga. No estudo, avaliaram a mancha de inundação obtida, o número e local de poços de visita que transbordaram e concluíram que o sistema de drenagem foi subdimensionado e carece de melhorias, porém, com a distribuição dos volumes de escoamento, recuperação da rede principal e aplicação de técnicas compensatórias distribuídas pode-se mitigar os problemas de alagamento na área.

Nogueira et al. (2018) propuseram uma metodologia que combina condições extremas de chuva e maré aplicando a modelagem 2D do PCWMM na bacia do Guaramar no município de Praia Grande-SP, na simulação adotaram o uso de válvulas de controle de fluxo e condições de contorno de jusante (maré) e montante (hidrogramas de cheia), que representam a interação entre a elevação do nível do mar e da água da drenagem pluvial. Atestaram a importância de análises combinadas para melhor subsidiar ações no controle de riscos de inundações.

Sidek et al. (2021) realizaram modelagem 1D integrada ao 2D no PCSWMM para avaliação da drenagem superficial e mapeamento de risco de inundação na bacia de Damansara

na Malásia. Constatou-se que o incremento em tamanho do sistema de drenagem urbana, em termos de profundidade, pode reduzir a extensão das inundações em até 78%, além da diminuição das categorias de risco de áreas que passam a ser menos afetadas pelo aumento do nível de água.

Rodrigues et al. (2022) avaliaram a técnica LID de microrreservatórios de retenção em lote na bacia do Rio Frágoso em Olinda-PE com o auxílio do PCSWMM, e constataram uma redução de 61% na vazão de pico e entre 17% e 20% de redução no volume de escoamento para um Tempo de Retorno (TR) de 100 anos. Foi observado que Sub-bacias menos impermeabilizadas apresentaram maior redução da vazão de pico, entretanto, sub-bacias com urbanização avançada ainda obtiveram bons resultados.

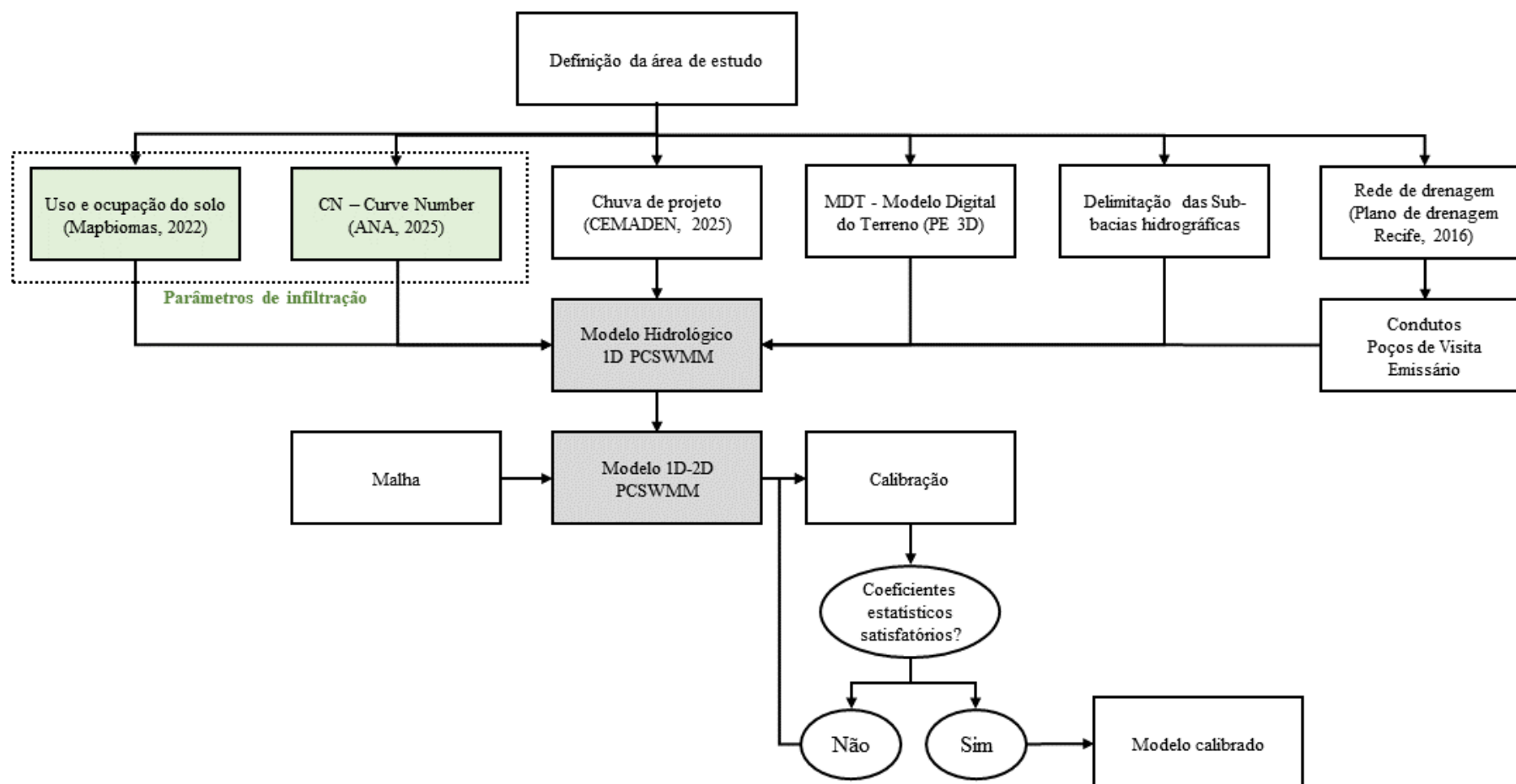
Sousa et al. (2021) realizaram modelagem de LIDs do tipo telhado verde na cidade de Teresina-PI com auxílio do PCSWMM e, a partir da contraposição de um cenário inicial e um posterior com as LIDs modeladas foi perceptível a interferência, e redução do pico, volume e adiamento do início do escoamento da bacia analisada.

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho está atrelada a modelagem hidrodinâmica integrada 1D-2D da drenagem urbana de uma bacia hidrográfica urbana com auxílio do programa PCSWMM versão 7.6.3695 adotando um evento de chuva intensa no município do Recife-PE.

De modo geral, para alcançar os objetivos do estudo, foi realizada uma pesquisa bibliográfica para amparar a estruturação do trabalho, reconhecimento da área, coleta e tratamento dos dados, construção e calibração de modelo hidrológico-hidráulico e avaliação do escoamento superficial na bacia com auxílio de programas computacionais, conforme o fluxograma apresentado na Figura 15.

Figura 15: Fluxograma da metodologia do modelo PCSWMM.



Fonte: O Autor (2025).

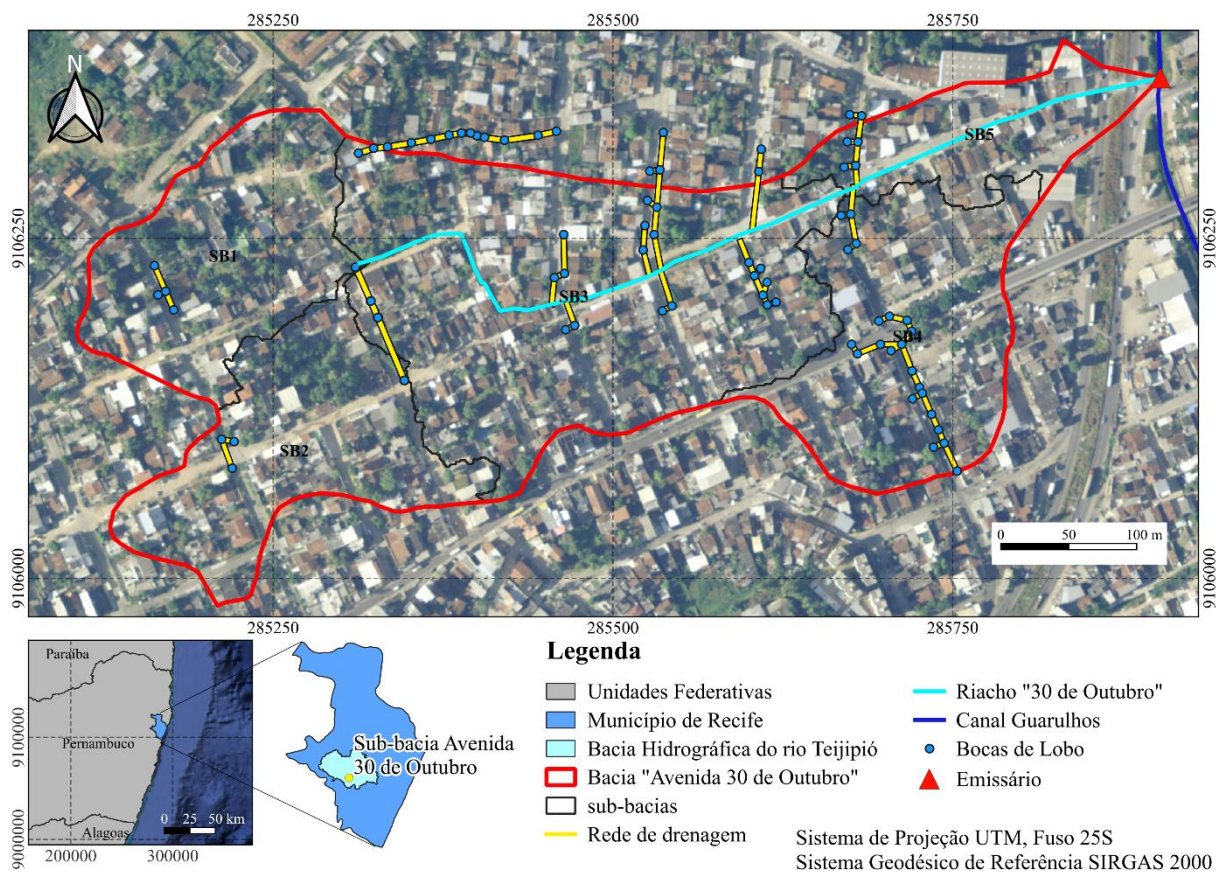
3.1 Bacia hidrográfica Avenida 30 de Outubro

3.1.1 Localização e generalidades

A bacia do rio Jiquiá, sub-bacia do rio Tejipió, abrange uma área de aproximadamente 20,38 km². Em seu trecho superior, pela margem direita, recebe as águas drenadas das regiões do Curado e do Jardim Botânico. Já na margem esquerda, pequenos afluentes convergem para a bacia, coletando a drenagem de áreas como Cidade Universitária, Ceasa, San Martin, Jiquiá e Mangueira.

Na pesquisa, a área de estudo adotada foi a bacia hidrográfica denominada Avenida 30 de Outubro, sub-bacia do rio Jiquiá, como pode ser observado na Figura 16. A bacia apresenta uma área em torno de 0,163 km², é totalmente urbanizada, sofre com problemas recorrentes tanto de inundação quanto de alagamentos em diversos pontos, e localiza-se no bairro Jardim São Paulo, o qual possui 29.996 habitantes e densidade demográfica de 115,59 habitante/hectare de acordo o Censo do IBGE de 2022.

Figura 16: Localização da bacia Avenida 30 de Outubro.



Fonte: O Autor (2025).

3.1.2 Hidrografia

O riacho “30 de Outubro”, principal canal da bacia, inicia-se na Rua Barão de Anádia e segue pela Avenida 30 de Outubro até seu deságue no Canal Guarulhos, um dos afluentes do Rio Jiquiá. O riacho possui 662,38 m de extensão e enfrenta diversas interferências que comprometem sua funcionalidade, conservação e integração com a cidade.

Ao longo de suas margens, a ocupação irregular é um problema recorrente, gerando impactos na dinâmica natural do curso d'água. Sua calha apresenta diversos trechos de seção reduzida, canalizada e em um trecho do canal, a calha encontra-se inteiramente encoberta por ocupação urbana irregular. Essa obstrução não só dificulta o escoamento das águas, mas também intensifica os problemas ambientais e urbanos já existentes, com a diminuição da seção regular há agravamento do risco de inundação e alagamentos na região.

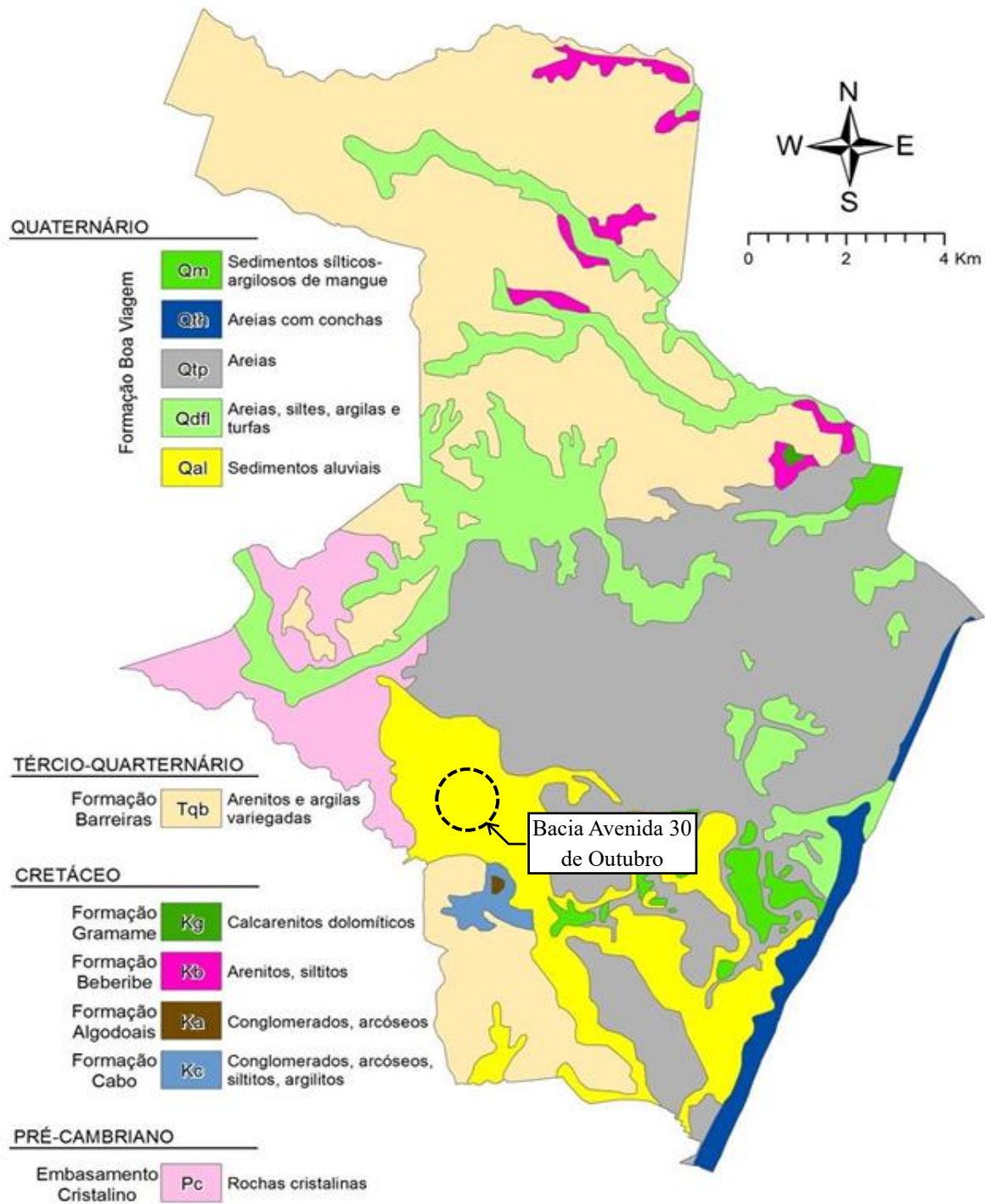
3.1.3 Clima

A cidade do Recife apresenta um clima quente e úmido, com período de chuvas intensas entre os meses de março e agosto, a média das precipitações é sempre acima de 1.500 mm anuais, de influência marítima. Tomando-se por base a classificação climática proposta por Köppen, a área de Recife enquadra-se na zona de domínio do subgrupo climático “As”, Tropical úmido e quente, sem estação fria e com temperatura média do mês menos quente acima de 25°C (EMLURB, 2013).

3.1.4 Geologia

A bacia Avenida 30 de Outubro, em seu trecho mais alto, acima de 4 metros, apresenta características geológicas semelhantes aos morros que semicircundam a planície do Recife, os quais são classificados como latossolos desenvolvidos por sedimentos argilo-arenosos provenientes de intemperização da formação barreira associada a rochas do embasamento cristalino. No trecho onde prevalecem as cotas entre 2 e 4 metros constata-se visualmente características de solo da planície de sedimentos aluviais conforme apresentado no Mapa Geológico do Recife na Figura 17 (Silva, 2010; EMLURB, 2013).

Figura 17: Mapa Geológico do Recife.



Fonte: EMLURB (2013).

3.1.5 Relevô

O relevo foi obtido através de um Modelo Digital do Terreno (MDT), que é um modelo matemático que representa a topografia do terreno, incluindo as características naturais. Ele é criado a partir de uma coleção de pontos de dados levantados por meio de tecnologias de sensoriamento remoto, como LiDAR (*Light Detection and Ranging*), fotogrametria aérea ou satélites. O MDT foi obtido por meio do Programa Pernambuco Tridimensional (PE-3D), um mapeamento aerofotogramétrico de todo território do estado de Pernambuco, com ortofotos na escala de 1:1000 e resolução espacial de 50 cm. Os produtos consistem em uma nuvem de pontos contendo as informações altimétricas do relevo, as quais foram convertidas para o formato *raster*, obtendo-se então o MDT da área de estudo.

3.1.6 Cobertura vegetal

A área de estudo trata-se de uma bacia hidrográfica densamente ocupada por edificações e muito impermeabilizada, com pequenas manchas de cobertura vegetal dentro da área urbana. Apresenta vegetação composta majoritariamente por árvores frutíferas de grande porte isoladas e presença de espécies de pequeno porte que não foram selecionadas ou plantadas corretamente, mas se desenvolveram devido a deterioração das margens do riacho principal.

3.2 Reconhecimento da área

Foi realizada uma visita técnica de reconhecimento e um voo com drone no dia 19 de novembro de 2024 para captar imagens detalhadas da região, visando um diagnóstico adequado do canal principal, identificando os pontos de interferência e contribuindo para a elaboração de estratégias de intervenção. O uso da tecnologia de drones, com auxílio de uma câmera de alta resolução integrada a aeronave, torna possível capturar imagens detalhadas e realizar o mapeamento de forma abrangente das características naturais e intervenções humanas na área sobrevoada.

O drone utilizado é do modelo DJI Mavic 3 Enterprise e a operação seguiu protocolos rigorosos, garantindo a segurança do voo e a qualidade dos dados coletados. A região do plano de voo que é a área da bacia de estudo, encontra-se na rota de trânsito de aeronaves do Aeroporto Internacional dos Guararapes, dessa forma, a altura máxima permitida para o voo foi de 20m por fins de segurança. Os equipamentos utilizados consistiram em uma aeronave com quatro

hélices, equipada com uma câmera de alta resolução, estabilizadores e sensores de presença, bem como, um controlador com monitor e controles para guiar o voo, conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18: Equipamentos e Drone.



Fonte: O Autor (2025).

O ponto de apoio para a operação foi a Escola De Referência em Ensino Médio Professor Trajano de Mendonça, localizada na Rua Capetinga, no bairro Jardim São Paulo em Recife-PE. É importante a escolha de um local que ofereça condições de segurança adequadas, um pátio aberto afastado das redes de alta tensão e árvores de grande porte. Antes da partida foi verificada a condição do clima, formação de nuvens, circulação de aviões e pássaros nos arredores do ponto de apoio, a Figura 19 mostra o local.

Figura 19: Ponto de apoio para voo de Drone.



Fonte: O Autor (2025).

3.3 Dados de entrada para modelo PCSWMM

A modelagem hidrológica e hidrodinâmica foi realizada com auxílio do PCSWMM versão 7.6.3695 *Professional 2D*, associado ao SWMM versão 5.0.013 – 5.2.4, *software* de uso profissional e desenvolvido pela CHI, utilizado para determinação das manchas de inundação e pontos de extravasamento da rede de drenagem na bacia Avenida 30 de Outubro.

Para caracterização da bacia Avenida 30 de Outubro foi calculada a área de drenagem (km²), o perímetro (km) com auxílio do *software* QGIS versão 3.32.3 e a declividade (m/m) pelo MDT. Outros parâmetros geomorfométricos foram obtidos, como o Coeficiente de compacidade ou Índice de Gravelius (Kc) que representa a relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia para mensurar sua irregularidade, conforme mostra a Equação (3) (Villela e Mattos, 1975).

O Fator de forma atua como um indicativo da maior ou menor tendência para enchentes de uma bacia, um valor alto próximo de 1 significa que uma bacia é mais sujeita a enchentes que outra com valor menor, uma vez que bacias estreitas e longas tem menor probabilidade de chuvas intensas abrangendo toda a sua extensão. O cálculo é realizado a partir da Equação (4). Já a Sinuosidade é a relação entre o comprimento do rio principal e o comprimento do talvegue, medido em linha reta, calculado pela Equação (5) (Villela e Mattos, 1975).

$$Kc = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (3)$$

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (4)$$

$$Sin = \frac{L}{L_t} \quad (5)$$

O tempo de concentração da bacia foi calculado pelo método de Kirpich, ideal para bacias com área abaixo de 0,5km², sua fórmula é apresentada na Equação (6) (Collischonn et al. 2015).

$$t_c = 57 \cdot \left(\frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385} \quad (6)$$

Sendo: Kc o Coeficiente de Compacidade; P o perímetro da bacia (km); A a área da bacia (km²); K_f o Fator de Forma; L o comprimento do rio principal (km); L_t o comprimento de talvegue medido em linha reta (km); t_c o tempo de concentração (min); Δh a diferença de altitude ao longo do curso d' água principal (m).

No processo de obtenção dos parâmetros de entrada para o modelo hidrológico no PCSWMM, a bacia Avenida 30 de Outubro foi dividida em 5 sub-bacias com auxílio do programa HEC-HMS versão 4.9, e foram obtidas para cada sub-bacia a respectiva área (ha), largura superficial (m), declividade (%) e área impermeável (%).

Para caracterização do uso e ocupação do solo foi consultado o mapa de uso e ocupação de terra do Brasil do Projeto MapBiomas para o ano de 2022, obtido em formato raster com 10 metros de resolução espacial. Assim, foi utilizado como base para adoção dos parâmetros de Impermeabilidade (%), N_{Imperv} (Coeficiente de Rugosidade Manning para área impermeável), N_{Perv} (Coeficiente de Rugosidade Manning para área permeável), $Dstore_{Perv}$ (armazenamento em depressão para área permeável, em mm) e $Dstore_{Imperv}$ (armazenamento em depressão para área impermeável, em mm), as tabelas de consulta para os esses parâmetros estão disponíveis no **Anexo A**.

O modelo de infiltração utilizado é o Curva Número, baseado no método SCS do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA). Em sua forma clássica, o modelo utiliza a Equação (7) associando o escoamento com o total precipitado em um evento.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S_{\max}} \quad (7)$$

Sendo: $S_{\max}$ a capacidade máxima de armazenamento de umidade do solo ou a diferença no volume de água contido em um solo saturado e um solo drenado (mm); Q o escoamento superficial (mm); P a precipitação (mm) e I_a a abstração inicial (mm).

A abstração inicial (I_a) representa todas as perdas antes do início do escoamento, isso inclui a água retida em depressões superficiais, água interceptada pela vegetação, evapotranspiração e infiltração. O PCSWMM já leva em conta esse fenômeno por meio de seu parâmetro de armazenamento de depressão. Para o caso de pequenas bacias hidrográficas, a I_a pode ser obtida pela Equação (8).

$$I_a = 0,2 \cdot S_{\max} \quad (8)$$

O S_{max} é derivado de um número de curva CN tabelado, que varia de acordo com o Grupo Hidrológico (baseado no tipo de solo) e as condições antecedentes, correspondendo a capacidade de infiltração na camada superior do solo, a partir da Equação (9).

O número CN é um parâmetro adimensional que varia de 0 a 100, considera-se 0 o solo com capacidade de infiltração “infinita” e 100 um solo impermeável (Rossman et al., 2022).

$$S_{max} = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (9)$$

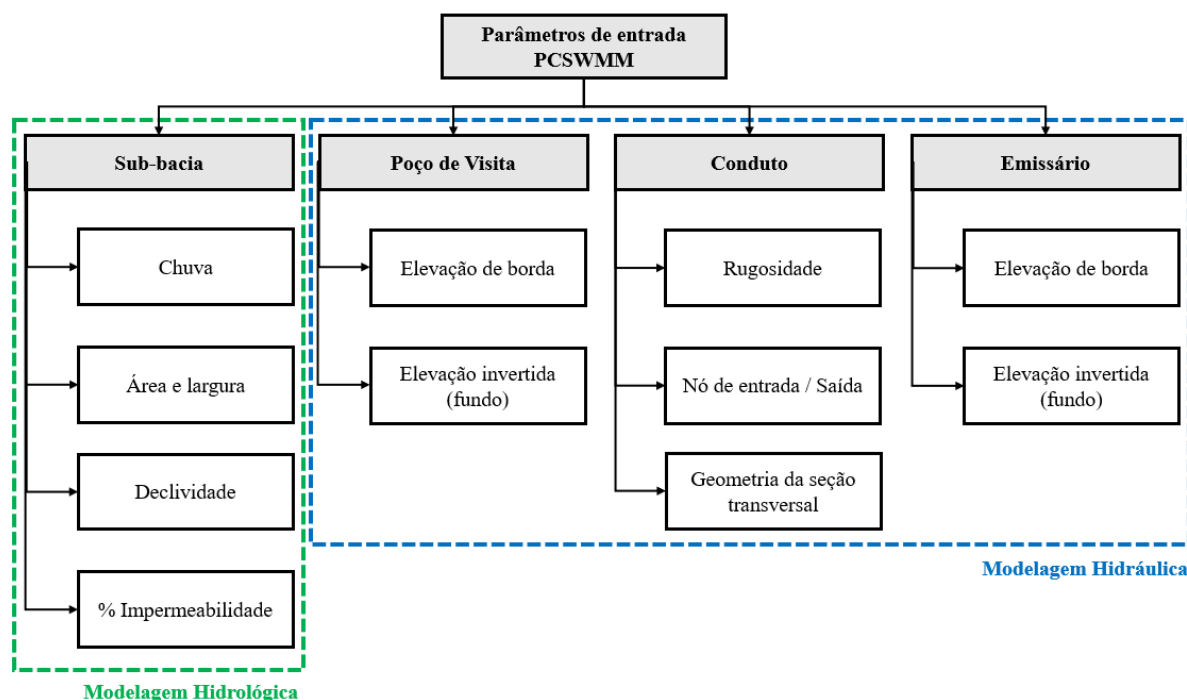
Para a determinação do parâmetro CN, foi consultado o catálogo de metadados da ANA, que reúne dados os índices de Curva Número (CN) para todo território brasileiro para o ano de 2022, disponibilizado em formato raster (grid) com resolução espacial de 30 m. A base CN de 2022 utiliza os dados de uso do solo e ocupação da terra do respectivo ano do projeto MapBiomias.

Para determinar o valor do CN faz-se necessária a consulta ao mapa de uso e ocupação do solo na bacia e definição do grupo hidrológico representativo, esse parâmetro representa as propriedades hidrológicas do solo, como por exemplo, resistência a erosão, capacidade de infiltração e potencial de escoamento superficial

Para a realização das simulações 2D no modelo foram utilizados os seguintes dados de entrada: MDT, o eixo do riacho 30 de Outubro, o cadastro da microdrenagem e as vazões para cada sub-bacia, obtidas a partir do modelo hidrológico já integrado no PCSWMM.

O contorno da bacia Avenida 30 de Outubro, assim como o eixo dos canais e rios adjacentes a área de estudo, foi obtido por meio do banco de dados da hidrografia disponibilizado pela Prefeitura do Recife. A partir do cadastro da drenagem disponibilizado pelo Plano de Drenagem da Prefeitura do Recife em 2016 foi obtido o cadastro da microdrenagem da bacia. Para a construção do modelo 1D-2D, foi necessário atribuir os parâmetros de entrada para cada elemento constituinte do sistema de drenagem, conforme esquematizado na Figura 20.

Figura 20: Parâmetros de entrada para os elementos de drenagem no modelo PCSWMM.



Fonte: O Autor (2025).

Neste trabalho, o modelo foi construído de forma que a rede de transporte 1D seja conectada diretamente à planície de inundação 2D. Na configuração bidimensional foi adicionada uma malha hexagonal de resolução 2 m e um coeficiente de rugosidade de 0,20. Posteriormente, foi gerada uma camada de nós 2D usando os dados de elevação do MDT para representar a topografia da planície de inundação.

Para a modelagem integrada 1D-2D, cada junção no modelo 1D foi conectada ao ponto de junção 2D mais próximo, usando a ferramenta de conexão no PCSWMM. Esta ligação permite a transferência de fluxo do modelo de drenagem 1D para o modelo 2D para extensões de áreas de inundação.

Os dados de condutos e dispositivos constituintes da rede de drenagem foram obtidas pelo Plano Diretor de Drenagem do Recife de 2016 e complementados por medições em campo. Com relação a macrodrenagem, foi realizado o cadastro das seções do riacho Avenida 30 de Outubro e a divisão em 9 (nove) trechos que representam as diferentes interferências na geometria do canal.

Além disso, foram obtidos dados de nível do rio Jiquiá na região de confluência com o Canal Guarulhos a partir do sensor de medição de nível instalado pela UFPE na escola Professor Trajano de Mendonça. Estes dados serão considerados como condições de contorno de jusante

aplicadas no ponto exutório para avaliação dos efeitos de remanso no riacho e rede de microdrenagem da bacia.

3.4 Chuva de projeto

No modelo PCSWMM, os dados de precipitação são fornecidos como uma série temporal definida pelo usuário ou por meio de um arquivo de dados externo, que por sua vez, interpreta os dados de chuvas em formato de intensidade, volume, ou volume acumulado. A obtenção dos dados de chuva deu-se por meio da plataforma do Mapa Interativo do CEMADEN, foi adotada a estação pluviométrica 261160609A do CEMADEN, localizada no bairro da Imbiribeira. O evento simulado ocorreu entre os dias 3 e 7 de fevereiro de 2025, com duração de 96 horas, iniciando às 00:00 do dia 3 de fevereiro e encerrando às 00:00 de 7 de fevereiro de 2025.

Na ocasião do evento, diversos pontos da cidade do Recife foram impactados, com registros de alagamentos, inundações, quedas de árvores e deslizamentos de terra, foi necessária a interrupção do expediente em empresas e órgãos públicos, bem como, a suspensão de aulas em escolas e faculdades. A mobilidade foi comprometida e em determinados locais houve a impossibilidade de circulação de veículos como ônibus e caminhões devido o avanço da água, deixando as vias intransitáveis em determinados trechos de ruas e avenidas.

A APAC atribuiu as chuvas ao fenômeno meteorológico chamado vórtice ciclônico de altos níveis. Trata-se de uma área de alta pressão que se forma na alta troposfera com ventos que giram no sentido horário, causando chuva, ventos intensos, e agitação marítima. O Centro de Operações do Recife considerou estado de alerta máximo no município (Prefeitura do Recife, 2025). O pico das chuvas ocorreu entre às 7h30 e 10h30 da quarta-feira (05/02/2025). Foram confirmadas 6 vítimas fatais, infelizmente, uma delas foi acometida no bairro de Jardim São Paulo, próximo à área de estudo deste estudo. A Figura 21 e Figura 22 apresentam imagens obtidas do local em visita realizada no dia 5 de fevereiro de 2025, as quais mostram os impactos desse evento.

Figura 21: Carro coberto pela água na Rua Aguati, em Jardim São Paulo – 05/02/2025.



Fonte: Autor (2025).

Figura 22: Alagamento no cruzamento da Rua Leandro Barreto e Rua Lorena, em Jardim São Paulo – 05/02/2025.

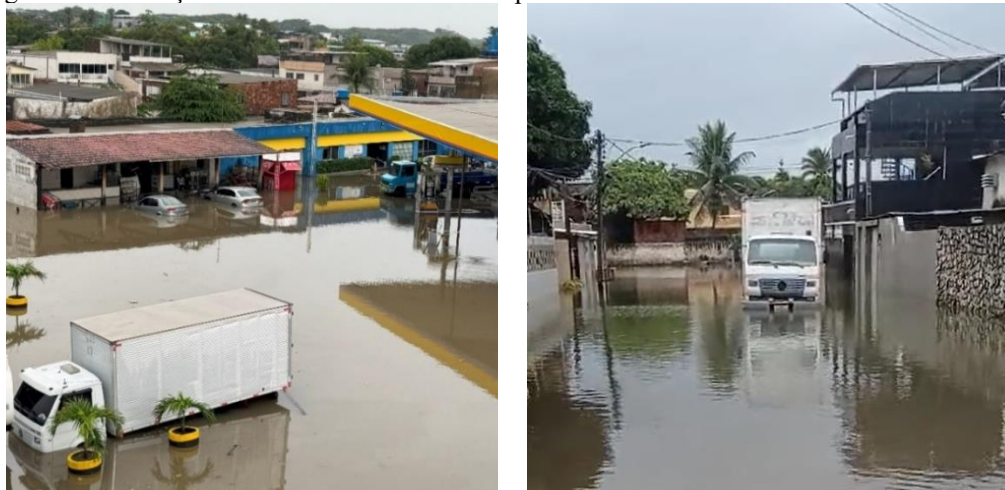


Fonte: Autor (2025).

Devido a intensidade das chuvas, diversas estações pluviométricas próximas a área foram danificadas e não puderam realizar leitura dos dados pluviométricos. Foi realizada uma solicitação na ouvidoria do Governo Federal para obtenção dos dados por meios alternativos, mas foi confirmada a impossibilidade de obter os dados devido as condições das estações.

É perceptível que a região próxima ao exutório da bacia apresenta grave vulnerabilidade a alagamentos e inundações, onde foi possível registrar as maiores alturas de alagamento da bacia, especialmente no cruzamento da Rua Leandro Barreto e Rua Lorena, próximo ao viaduto da Rua Leandro Barreto, foi medido 1,05m de altura de lâmina d'água.

Figura 23: Inundação em Posto de Gasolina e rua próximos a Avenida 30 de Outubro – 05/02/2025.



Fonte: Autor (2025).

Outrossim, o canal Guarulhos, receptor do riacho “30 de Outubro” também apresenta extrema vulnerabilidade a inundações (Figura 24), o aumento do nível do canal pode impactar

na drenagem da bacia Avenida 30 de Outubro ao impedir o fluxo de escoamento do riacho principal.

Figura 24: Canal Guarulhos inundado, receptor da vazão do riacho Avenida 30 de Outubro – 05/02/2025.



Fonte: Autor (2025).

3.5 Calibração do modelo

A calibração ocorreu através da determinação de um coeficiente de rugosidade de Manning adequado para a simulação do evento. Para isso, foram medidos pontos de altura de lâmina de água em campo logo após o evento ocorrido, para comparação com os valores obtidos na mancha de inundação calculada pelo PCSWMM. Os valores de rugosidade foram modificados repetidas vezes dentro do intervalo de 0,12 a 0,20 para áreas urbanas fornecido pela tabela de coeficientes de Manning do *Natural Resources Conservation Service* do Kansas (NRCS-Kansas, 2016).

Dessa forma, foram calculados coeficientes estatísticos para avaliar o desempenho do modelo, mencionados a seguir:

- **Coefficiente de determinação (R^2):** avalia o nível de correlação linear entre os dados simulados e observados. Seu valor fica entre 0 e 1 apresentando melhor concordância e desempenho quanto mais próximo de 1 (Pearson, 1901; Rodrigues, 2021). O R^2 é calculado a partir da Equação (10).

$$R^2 = \frac{\sum (Y_{obs} - \overline{Y_{média_{obs}}})^2 \cdot (Y_{sim} - Y_{média_{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - \overline{Y_{média_{obs}}})^2 \cdot (Y_{sim} - Y_{média_{sim}})^2} \quad (10)$$

- **Coefficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE):** avalia o ajuste dos dados simulados e a precisão do modelo, seu valor é determinado entre $-\infty$ e 1, quando mais próximo de 1 melhor a concordância entre o que é simulado e o observado (Nash e Sutcliffe, 1970; Rodrigues, 2021). A Equação (11) é a fórmula utilizada.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - \overline{Y_{média_{obs}}})^2} \quad (11)$$

- **Percent Bias (PBIAS):** indica a diferença de volume entre os fluxos simulado e observado, pode-se obter valores negativos ou positivos representando superestimação e subestimação, respectivamente, sendo o ideal próximo de 0 (Legates e McCabe, 1999; Rodrigues, 2021). A metodologia de cálculo é baseada na Equação (12).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{sim}) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n (Y_{obs})} \right] \quad (12)$$

Sendo: Y_{obs} a lâmina de água observada em campo; Y_{sim} a lâmina de água do modelo; $Y_{média_{obs}}$ a média das lâminas de água observadas em campo; $Y_{média_{sim}}$ a média das lâminas de água do modelo.

Munir et al. (2020) aplicaram o modelo PCSWMM na bacia de Vidor, no Paquistão, e constataram bom desempenho do modelo ao utilizar os indicadores estatísticos NSE e R^2 . No estudo, os valores de NSE variaram entre 0,75 e 0,97, o R^2 entre 0,94 e 0,98, indicando que o modelo conseguiu explicar a maior parte da variabilidade dos dados observados.

Kumar et al. (2019) avaliaram a calibração do modelo SWMM para redes de drenagem urbana em áreas altamente urbanizadas de Delhi, Índia. Através de indicadores estatísticos como o NSE e PBIAS. Os resultados apontaram valores de NSE entre 0,60 e 0,91 e PBIAS entre 1,29% e 7,41%, indicando alta precisão e eficiência na comparação de pontos críticos de inundação calculados e observados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

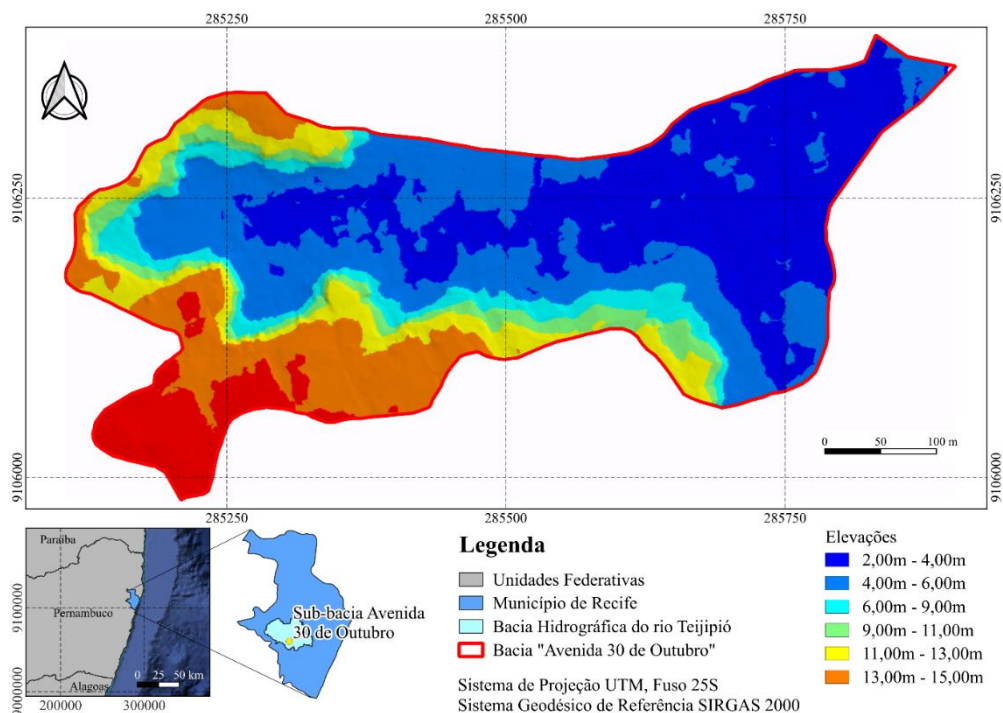
Este estudo analisou o sistema de drenagem de uma região do bairro de Jardim São Paulo, a bacia hidrográfica Avenida 30 de Outubro, observando o impacto de um evento de chuvas intensas na área, assim como, avaliando as condições do sistema atual de drenagem de águas pluviais. Utilizando o software PCSWMM, a modelagem hidrodinâmica foi calibrada a partir de pontos de lâmina de cheia medidos em campo.

4.1 Avaliação da área de estudo

4.1.1 Características geomorfométricas da Bacia Avenida 30 de Outubro.

Os parâmetros geomorfométricos da bacia Avenida 30 de Outubro são típicos de bacias inseridas em ambientes urbanos e foram resumidos na Tabela 1. A partir do MDT da área de estudo foi possível observar a topografia da região, caracterizada por morros que apresentam elevações entre 6 e 15m. Na Figura 25 é possível observar as diferentes elevações ao longo da bacia Avenida 30 de Outubro. A área possui declividade média de 9,34% e, pelo fato de a bacia ser inteiramente urbanizada as condições naturais foram modificadas. Dessa forma, o escoamento superficial é direcionado pela infraestrutura construída, composta pela rede de drenagem.

Figura 25: Hipsometria da bacia Avenida 30 de Outubro.



Fonte: O Autor (2025).

A bacia possui uma área (A) de 0,164 km² e um perímetro (P) de 2,316 km, sendo considerada de pequeno porte. O coeficiente de compacidade (Kc) obtido foi de 3,962 e o fator de forma (F) aproximadamente 0,373, os quais indicam que a bacia possui uma forma alongada e pouco circular, características que favorecem a drenagem das águas pluviais.

Os comprimentos obtidos para o riacho 30 de Outubro e a rede de drenagem total foram 0,662 km e 1,751 km, respectivamente. A sinuosidade (Sin) foi calculada em 1,087, e indica que o talvegue da bacia, o mesmo do curso do riacho, apresenta baixo grau de curvatura. A declividade média da bacia obtida pelo MDT foi de 0,0934 m/m. Além disso, o tempo de concentração (tc) obtido para a bacia foi de aproximadamente 48,160 minutos.

Tabela 1: Resumo das características geomorfométricas da Bacia Avenida 30 de Outubro.

Parâmetro	Valor
Área de drenagem (A)	0,164 km ²
Perímetro da bacia (P)	2,316 km
Coeficiente de compacidade (Kc)	3,962
Fator de forma (F)	0,373
Tempo de concentração (tc)	48,160 min
Comprimento do canal principal	0,662 km
Comprimento de todos os canais	1,751 km
Sinuosidade (Sin)	1,087
Declividade média da bacia	0,0934 m/m

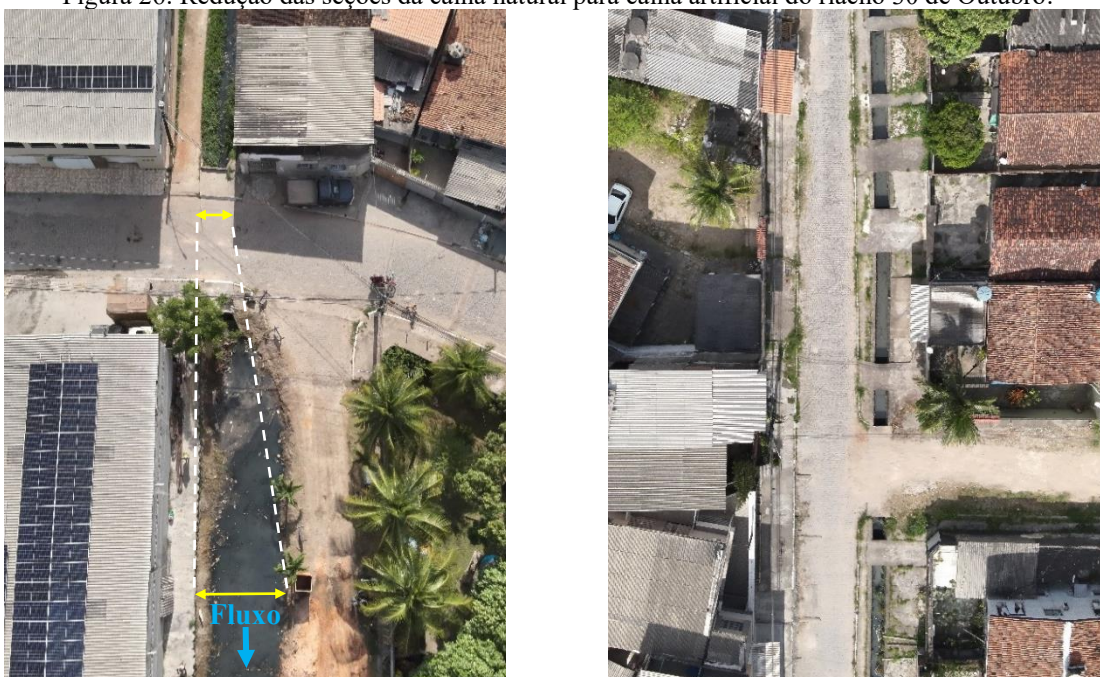
Fonte: O Autor (2025).

Esses resultados indicam um potencial para escoamento superficial concentrado e tempo de resposta relativamente curto, sendo fortemente influenciado pela urbanização e pelos altos níveis de impermeabilização da bacia.

4.1.2 Diagnóstico da rede de drenagem existente

A área de estudo apresenta 83 dispositivos de microdrenagem, 60 condutos representando os canais e bueiros, e um exutório da bacia, como descarga do riacho 30 de Outubro. A Figura 26 trata-se de uma imagem capturada pelo drone que apresenta o estreitamento da seção da calha natural por conta da passagem de uma via, mudando para uma calha artificial de seção retangular em concreto com dimensões de 1,45m de largura e 1,05m de profundidade (Figura 27) medidas em campo.

Figura 26: Redução das seções da calha natural para calha artificial do riacho 30 de Outubro.



Fonte: O Autor (2025).

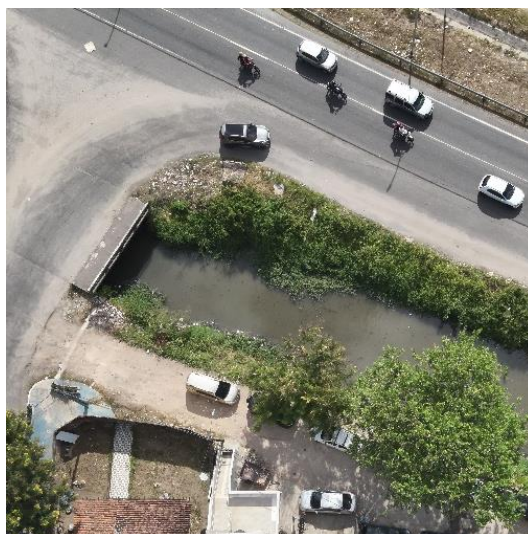
Figura 27: Seção retangular do riacho 30 de Outubro.



Fonte: O Autor (2025).

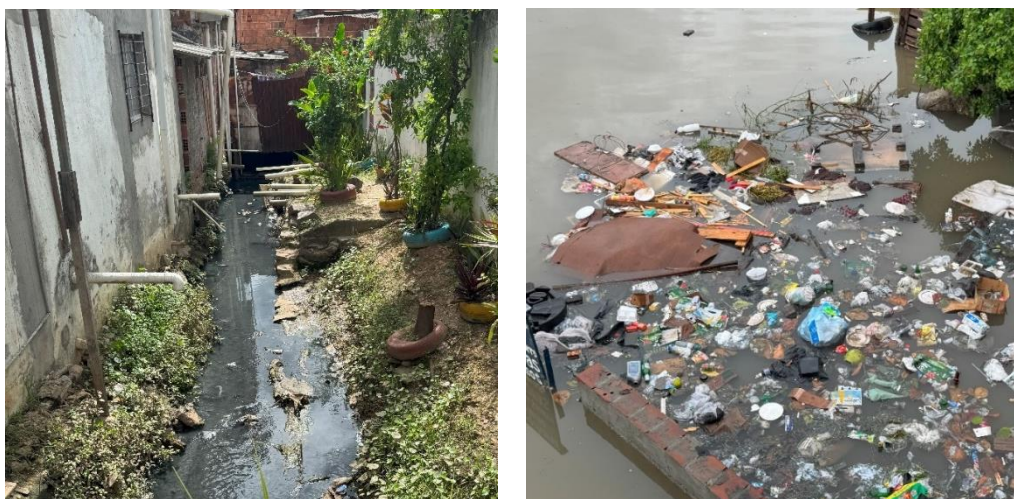
A Figura 28 apresenta um trecho do riacho 30 de Outubro de deságue no Canal Guarulhos que possui contato direto com áreas urbanizadas e a BR-101, uma via de tráfego intenso. Constata-se também a presença de vegetação no leito e margens do riacho, o que sugere a existência de processos de degradação ambiental devido o lançamento irregular de compostos orgânicos por esgotos sanitários e resíduos sólidos no riacho, um fator que compromete a qualidade da água e funcionalidade do canal, conforme observado na Figura 28 e Figura 29.

Figura 28: Presença de vegetação na calha natural do riacho 30 de Outubro.



Fonte: O Autor (2025).

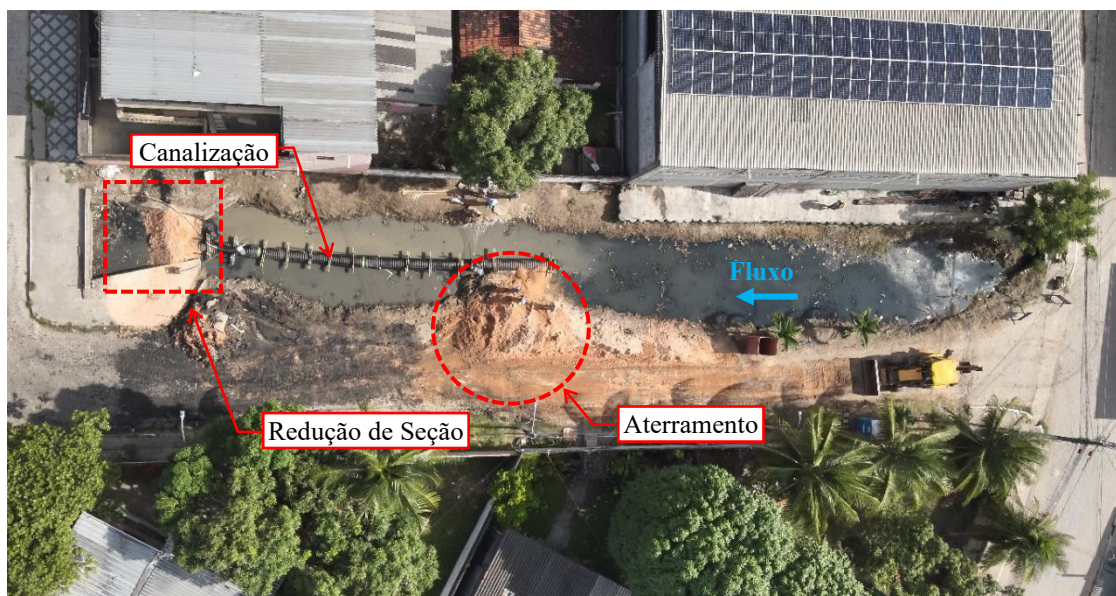
Figura 29: Lançamento de esgoto e acúmulo de lixo no riacho 30 de Outubro.



Fonte: O Autor (2025).

Além disso, durante o voo, o drone capturou imagens de uma obra em execução em um trecho do canal na Avenida 30 de Outubro, onde é perceptível o aterramento da margem à esquerda da seção do canal do riacho. Não foi possível observar placas da obra, para um melhor entendimento das ações realizadas, entretanto ressalta-se que o estreitamento da calha natural está atrelado a um maior risco de inundações. É importante frisar como este tipo de levantamento auxilia no monitoramento de intervenções que podem estar em desacordo com as regulamentações ambientais, subsidiando a definição de medidas corretivas e preventivas alinhadas à preservação dos recursos hídricos.

Figura 30: Presença de obras no riacho sem sinalização e com indicação de irregularidades.



Fonte: O Autor (2025).

Com relação a rede de condutos e dispositivos hidráulicos do sistema de drenagem urbana na bacia, observa-se que são mínimos. A distribuição da rede percorre apenas algumas ruas a jusante da bacia e locais pontuais a montante direcionando o deflúvio no sentido leste para oeste. Essas redes coletoras convergem para o canal principal, o riacho 30 de Outubro, que percorre grande parte da bacia e conduz a água até o deságue no Canal Guarulhos.

Em dois trechos do riacho 30 de Outubro constata-se o encobrimento total do canal sobreposto por construções residenciais de forma irregular. Na Rua Dr. Holmes do Rego Barros há a redução da seção do riacho para um bueiro de 1,0 m de diâmetro (Figura 31), bem como na Avenida Trinta de Outubro (Figura 32).

Figura 31: Bueiro do riacho 30 de Outubro.



Fonte: O Autor (2025).

Figura 32: Encobrimento do riacho 30 de Outubro.



Fonte: O Autor (2025).

Este tipo de interferência impacta diretamente na capacidade de escoamento do riacho, que originalmente seguia seu curso natural, mas sofreu sucessivas alterações antrópicas. Primeiramente, teve suas margens retificadas e leito canalizado em concreto, reduzindo a seção transversal. Posteriormente, em alguns trechos, o curso d'água foi completamente encoberto por ocupações irregulares. Essas modificações, somadas ao estreitamento progressivo de sua calha, impõem restrições hidráulicas críticas ao sistema, elevando os riscos de transbordamentos durante eventos de precipitação intensa.

De acordo o cadastro realizado pelo Plano de Drenagem da Prefeitura do Recife em 2016, o sistema de microdrenagem é composto por 55 Caixas Coletoras, 2 Bocas de Lobo com grelha, uma rede de canaletas com 90 m de extensão de seção meia-cana com 40 cm de diâmetro e uma rede de condutos subterrâneos com 816,04 m de extensão em seção retangular de 50 cm de largura e 70 cm de profundidade.

No dia 11 de fevereiro de 2025 foi realizada uma visita técnica para coleta de dados, vistoria dos dispositivos de drenagem cadastrados e o diálogo com a comunidade acerca dos problemas enfrentados com alagamentos na área.

Na ocasião da visita, como mostra a Figura 33, foram observadas diversas caixas coletoras com proliferação de vegetação e a entrada para as galerias subterrâneas total ou parcialmente obstruídas por má execução, lixo e entulho. Muitas caixas depredadas e com suas lajes destruídas, a falta de manutenção pode ser um fator preponderando para a defasagem e desgaste da rede de drenagem.

Figura 33: Caixas coletoras obstruídas, com vegetação e danificadas.



Fonte: O Autor (2025).

As duas únicas Bocas de Lobo com Grelha com registro na bacia também apresentam obstrução por assoreamento, lixo e proliferação de vegetação, como é possível observar na Figura 34.

Figura 34: Bocas de Lobo com Grelha.



Fonte: O Autor (2025).

Além disso, foi possível notar a existência de terrenos sem cobertura vegetal e à mercê de processos erosivos, bem como, ruas não calçadas ou asfaltadas que também apresentam processos erosivos. É válido ressaltar que o carreamento de sedimentos pela erosão pode acarretar no assoreamento do leito do canal de macrodrenagem e obstrução das galerias subterrâneas, outros estudos como Dawoud et al. (2023) constataram que os processos erosivos contribuem para a deposição de sedimentos na infraestrutura de drenagem urbana. A Rua Dr.

Freitas Lins apresenta seu revestimento em asfalto muito desgastado e apresenta pontos de erosão, sua drenagem é basicamente uma extensão de 90 m de canaletas meia cana que, como apresentado na Figura 35 estão desgastadas e obstruídas.

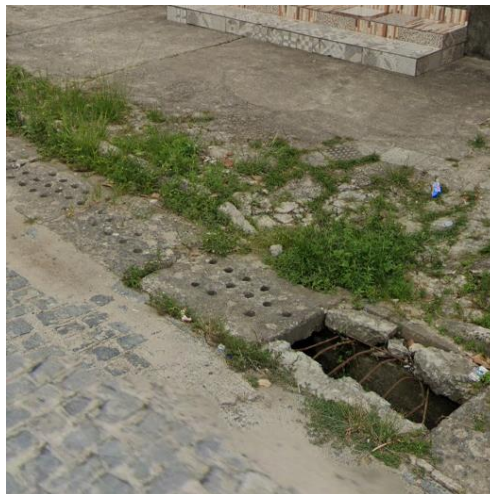
Figura 35: Rua Dr. Freitas Lins com pontos de erosão e canaletas de drenagem.



Fonte: O Autor (2025).

Em algumas ruas a oeste na bacia apresentam drenagem do tipo canaleta retangular, um dispositivo muito aplicado em regiões de topografia plana ou com desníveis pequenos. As canaletas apresentam dimensões 50 cm de largura e 70 cm de profundidade. Observa-se que, diversas tampas estão danificadas ou apresentam furos obstruídos, comprometendo o funcionamento do dispositivo.

Figura 36: Canaletas retangulares.



Fonte: Google Maps (2025).

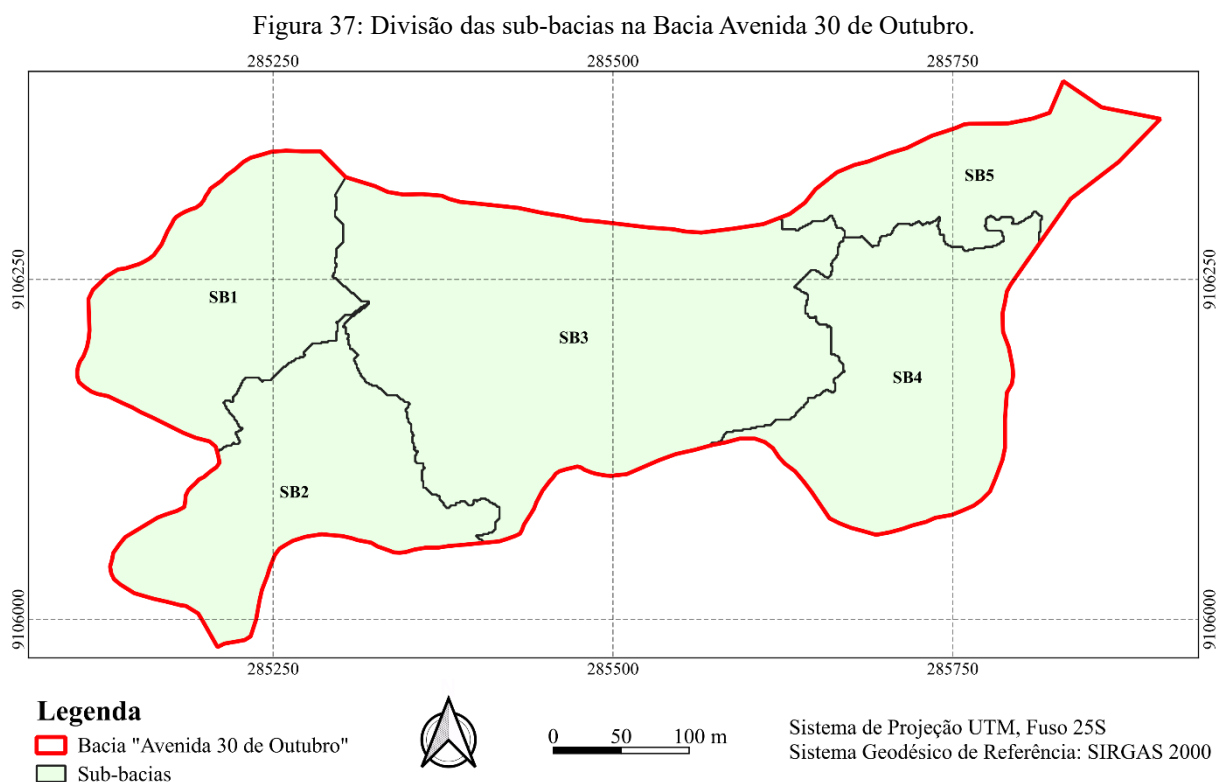
Ademais, constatou-se que a grande maioria das edificações residenciais e comerciais possuem drenagem direta para a rua, sem a presença de nenhuma ação para amortecimento de parte do volume de água da chuva seja por retenção ou detenção. Tal cenário significa que há um incremento grande das vazões de fonte ou de lote, o que pode provocar a saturação do sistema de drenagem.

A bacia Avenida 30 de Outubro desempenha um papel crucial tanto no aspecto social quanto ambiental, a comunidade inserida depende diretamente de seus recursos naturais e apresenta potencial para iniciativas de recuperação ambiental e drenagem sustentável, como a criação de parques lineares e a restauração de áreas degradadas, fortalecendo sua função ecológica e urbana.

4.2 Modelagem Hidrológica

4.2.1 Definição das áreas permeáveis e impermeáveis.

Para a modelagem hidrológica, a bacia Avenida 30 de Outubro foi dividida em 5 sub-bacias conforme apresentado na Figura 37.



Fonte: O Autor (2025).

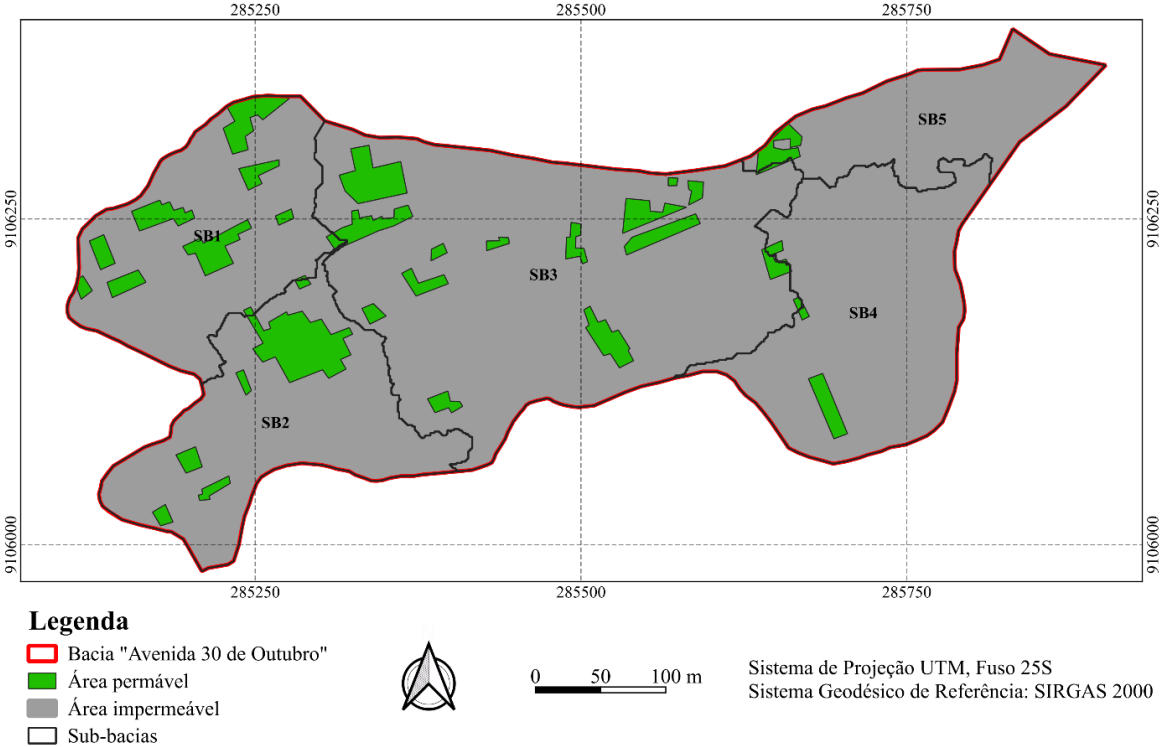
A partir das visitas em solo e o voo de drone, observou-se que a área de estudo é caracterizada por uma urbanização consolidada, com áreas verdes distribuídas pontualmente pela região. Complementarmente, a visualização proporcionada pelo Mapbiomas, embora confirme esse cenário, apresenta uma resolução mínima de 10m, o que dificulta a diferenciação das áreas permeáveis e impermeáveis. Dessa forma, a identificação foi realizada manualmente, por meio da análise de imagens de satélite do Google Earth, determinando as manchas “verdes” com presença de vegetação, as quais que podem contribuir para a absorção da água precipitada e definição da porcentagem de impermeabilização de cada sub-bacia. Os dados obtidos para a caracterização das sub-bacias no modelo PCSWMM e a distribuição das áreas verdes identificadas são apresentados na Tabela 2 e Figura 38, respectivamente.

Tabela 2: Dados de entrada das sub-bacias do modelo PCSWMM.

Sub-bacia	Área (ha)	Largura superficial (m)	Declividade (m/m)	Área Impermeável (%)
SB1	2,680	267,980	0,141	86,690
SB2	2,749	274,860	0,097	87,610
SB3	6,296	629,610	0,094	91,430
SB4	3,068	306,750	0,070	96,720
SB5	1,576	157,580	0,049	95,850

Fonte: O Autor (2025).

Figura 38: Definição das áreas permeáveis e impermeáveis na Bacia Avenida 30 de Outubro.



Fonte: O Autor (2025).

4.2.2 Parâmetros hidrológicos

O cálculo da infiltração baseou-se no modelo Curva Número e foi determinado o número CN a partir do banco de dados da ANA (2022), também o número de dias secos conforme recomendação do manual do usuário do SWMM (Rossman et al., 2022), apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de entrada para modelo de infiltração.

Parâmetros	Valor
CN	90,64
Dias secos	7,00

Fonte: O Autor (2025).

Entre os parâmetros necessários para o modelo hidrológico está o coeficiente “ n ” de rugosidade de Manning para os condutos, diferenciando entre fechados e abertos. Foram considerados, também, os coeficientes “ n ” de rugosidade Manning para as áreas permeáveis e impermeáveis, respectivamente, e para a malha de computação 2D. Adicionalmente, foram definidas as espessuras de armazenamento em depressão, em milímetros, seguindo os valores recomendados pelo manual do usuário do SWMM presentes no **Anexo A** (Rossman et al., 2022). A Tabela 4 resume todos os dados mencionados.

Tabela 4: Parâmetros determinados para dados de entrada no modelo PCSWMM.

Coeficiente de rugosidade de Manning					Armazenamento em depressões (mm)	
Condutos Fechados	Condutos Abertos	Malha	Impermeável	Permeável	Impermeável	Permeável
0,014	0,020	0,200	0,013	0,130	2,540	5,080

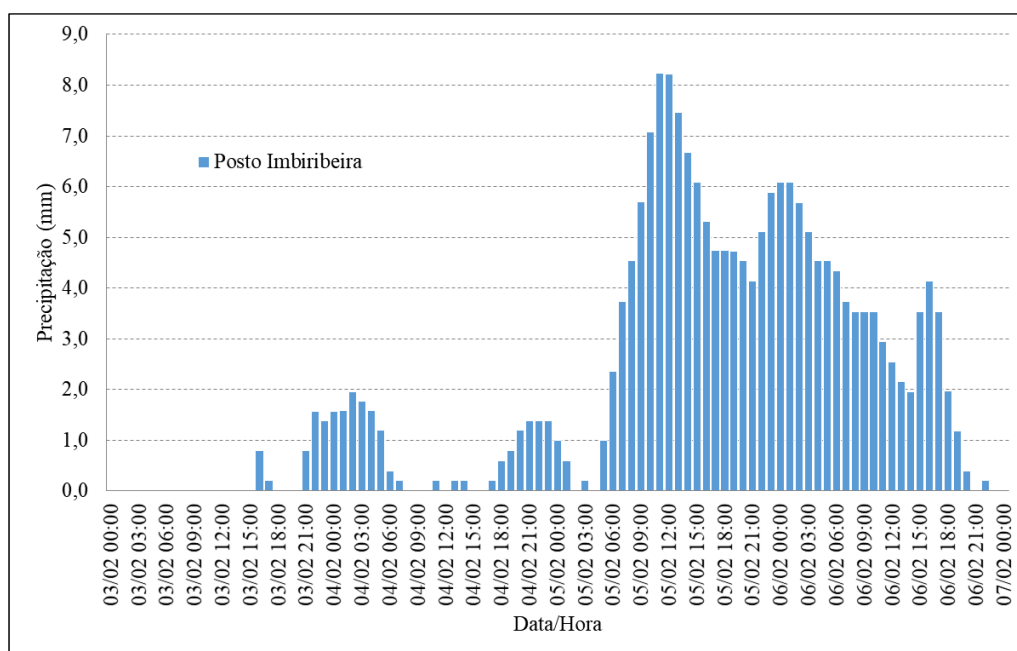
Fonte: O Autor (2025).

A pesquisa focou no evento de chuva intensa registrada entre os dias 03/02/2025 e 07/02/2025 ocorrido em Recife-PE, selecionado devido à sua magnitude e impactos registrados. Esse episódio foi associado a um vórtice ciclônico de altos níveis de acordo a APAC, e foram utilizados dados disponibilizados pelo CEMADEN do posto pluviométrico Imbiribeira,

totalizando uma precipitação acumulada de 200 mm, tendo seu período mais intenso entre às 09:00 e 15:00 horas do dia 05/02/2025.

Na ocasião, foram feitos registros fotográficos no local da área de estudo e houve o acompanhamento em tempo real durante o evento. A Figura 39 apresenta a distribuição pluviométrica obtida.

Figura 39: Série temporal da chuva de 03/02 a 07/02/2025 no posto Imbiribeira.



Fonte: CEMADEN (2025), elaborado pelo Autor (2025).

O evento adotado considerou um período de dias anteriores à intensificação das chuvas para o aquecimento do modelo, além de estabelecer um cenário de precipitação capaz de elevar o nível do canal Guarulhos e do rio Jiquiá à sua cota regular. Com isso, durante o desenvolvimento das chuvas entre os dias 05/02 e 06/02/2025, que totalizaram um acumulado de 175,41 mm, foi possível observar o impacto real do aumento da vazão e do volume escoado sobre a rede de drenagem e os canais existentes, permitindo ainda a identificação dos pontos de extravasamento.

Além disso, houve a preocupação de os níveis altos do canal Guarulhos e do Rio Jiquiá influenciarem o escoamento da drenagem da bacia Avenida 30 de Outubro, dessa forma foram colhidos dados dos níveis do rio Jiquiá por um sensor de medição de nível instalado na escola Professor Trajano de Mendonça que faz parte do sistema de monitoramento da bacia do rio Tejipió.

Quanto aos erros de continuidade na modelagem 1D, foram obtidos do relatório de simulação do PCSWMM e são apresentados na Tabela 5. A qualidade da simulação foi suficientemente boa e entregou resultados satisfatórios, com erros desprezíveis na equação da continuidade para o escoamento e para a propagação do fluxo, considerando que estão muito abaixo do máximo tolerável de 10%.

Tabela 5: Erros de continuidade para a modelagem hidrológica.

Simulação	Erros de continuidade (%)	
	Escoamento superficial	Propagação de fluxo
Calibração	-0,009%	0,033%

Fonte: PCSWMM, elaborado pelo Autor (2025).

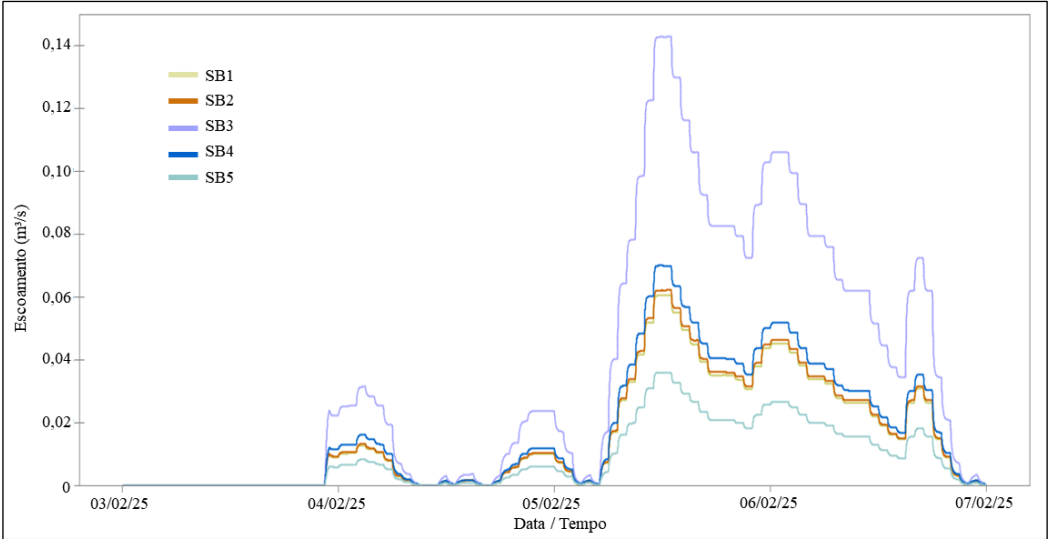
No modelo 1D do PCSWMM foi realizada a inserção dos dados dos dispositivos coletores, canaletas de microdrenagem, e do riacho 30 de Outubro. Cada sub-bacia teve seu dispositivo coletor associado a um nó “*Junction*” de saída e foram gerados os hidrogramas com as vazões máximas que constam na Tabela 6 e Figura 40, respectivamente.

Tabela 6: Vazões máximas por sub-bacia para o evento em 05 de fevereiro de 2025.

Sub-bacia	Vazão máxima (m³/s)	Volume escoado (m³)
SB1	0,061	5,2
SB2	0,062	5,3
SB3	0,143	12,3
SB4	0,069	6,0
SB5	0,036	3,1

Fonte: PCSWMM, elaborado pelo Autor (2025).

Figura 40: Hidrogramas das Sub-bacias durante a chuva de 03/02 a 07/02/2025.



Fonte: PCSWMM, elaborado pelo Autor (2025).

Ainda, é válido comparar o escoamento entre as sub-bacias com a área impermeável apresentada na Tabela 2. É possível destacar que a sub-bacia SB3 apresentou as maiores vazões e volumes escoados em razão de possuir a maior área superficial entre as sub-bacias sendo 91,43% dela impermeável, seguida da SB4, as sub-bacias SB2 e SB1 apresentaram valores próximos assim como suas áreas superficiais e porcentagem de área impermeável de 87,61% e 86,69% respectivamente, a SB5 teve a menor vazão e volume escoado, em m³/s.

Complementarmente, a Tabela 7 resume os valores obtidos da infiltração em mm/h, para as sub-bacias. De modo geral, percebe-se que a infiltração nas sub-bacias é baixa, o que significa um maior direcionamento do volume precipitado para o escoamento superficial.

Tabela 7: Infiltração por sub-bacia para o evento em 05 de fevereiro de 2025.

Sub-bacia	Infiltração máxima (mm/h)	Infiltração Total (mm)
SB1	0,182	3,087
SB2	0,169	2,873
SB3	0,117	1,987
SB4	0,045	0,761
SB5	0,057	0,962

Fonte: PCSWMM, elaborado pelo Autor (2025).

4.3 Modelagem Hidrodinâmica

Este item apresentará os resultados obtidos na calibração e simulação do evento de chuva entre os dias 03/02 e 07/02/2025 com o objetivo de avaliar o comportamento do escoamento superficial e identificar os pontos críticos de alagamento.

4.3.1 Calibração

Feita a simulação 1D, foi criada a malha 2D e realizada a conexão dos nós 1D com os nós 2D, de forma a representar o comportamento do fluxo da água nos canais de drenagem e em casos de insuficiência do sistema 1D, os pontos de extravasamento propagam o volume escoado superficialmente pela planície de inundação, representada por uma malha de células de resolução 2,00 m.

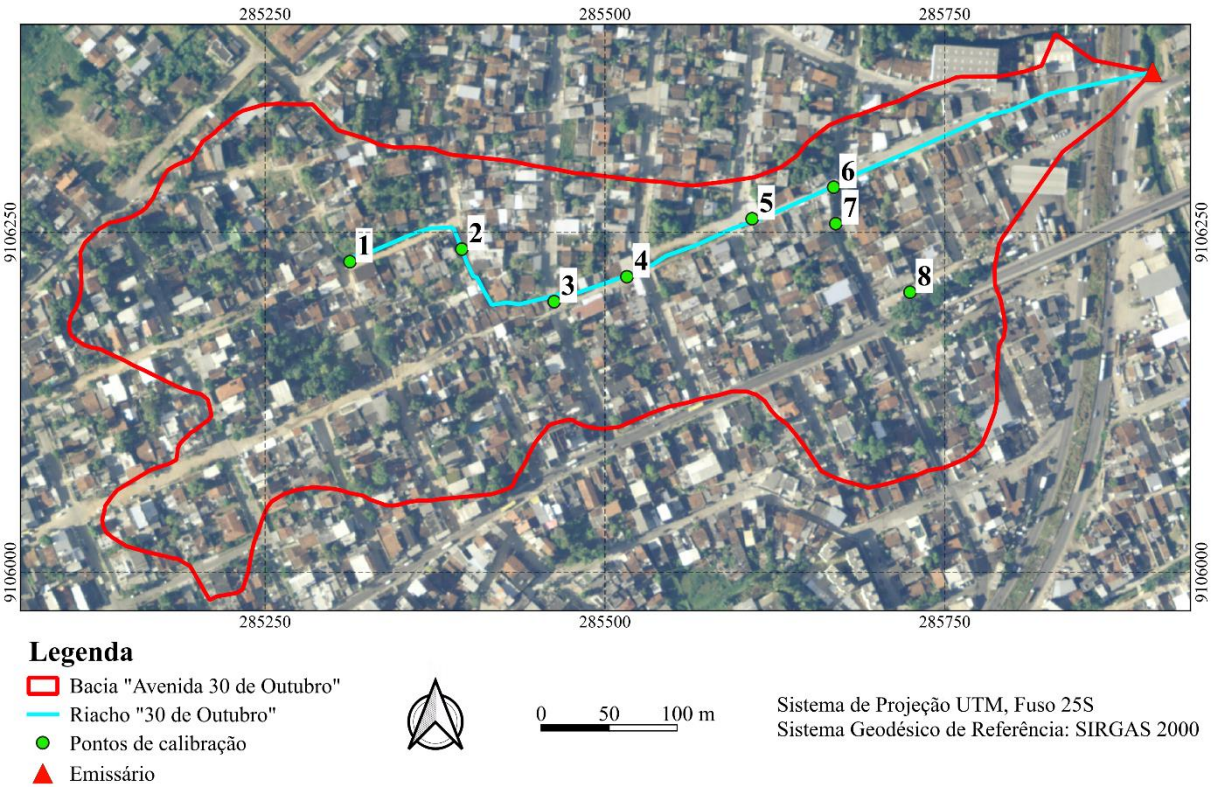
Os pontos de calibração levantados em campo foram implantados no modelo 2D do PCSWMM e têm seus dados e distribuição apresentados na Tabela 8 e Figura 41, respectivamente.

Tabela 8: Pontos de calibração levantados em campo.

Ponto	Coordenadas		Medição (m)
	X (m)	Y (m)	
1	285312,37	9106228,43	0,30
2	285394,66	9106237,66	0,30
3	285462,64	9106199,05	0,00
4	285516,17	9106217,36	0,40
5	285608,29	9106259,96	0,72
6	285668,28	9106283,18	0,22
7	285669,82	9106256,42	0,20
8	285724,45	9106206,00	0,50

Fonte: O Autor (2025).

Figura 41: Distribuição dos pontos de máxima cheia utilizados para calibração.



Fonte: O Autor (2025).

Para garantir a melhor representação do que acontece na realidade da região da bacia Avenida 30 de Outubro foram atribuídos diferentes valores de rugosidade de Manning para o escoamento em superfície dentro do intervalo de 0,10 a 0,20 como recomendado pela NRCS-Kansas (2016), sendo adotado o valor de 0,20.

Dessa forma, foram comparadas as lâminas de água medidas em campo com o calculado pelo modelo. Os índices apresentaram resultados satisfatórios e bom desempenho para o PBIAS próximo de $\pm 15\%$ para fluxos altos e NSE entre 0,65 e 0,75, o R^2 apresentou desempenho muito bom acima de 0,80. A Tabela 9 apresenta um resumo dos resultados obtidos.

Tabela 9: Coeficientes estatísticos para evento de chuva de 03/02 a 07/02/2025.

Coeficientes Estatísticos	Valores obtidos com a calibração
R^2	0,803
NSE	0,690
PBIAS	-14,773

Fonte: O Autor (2025).

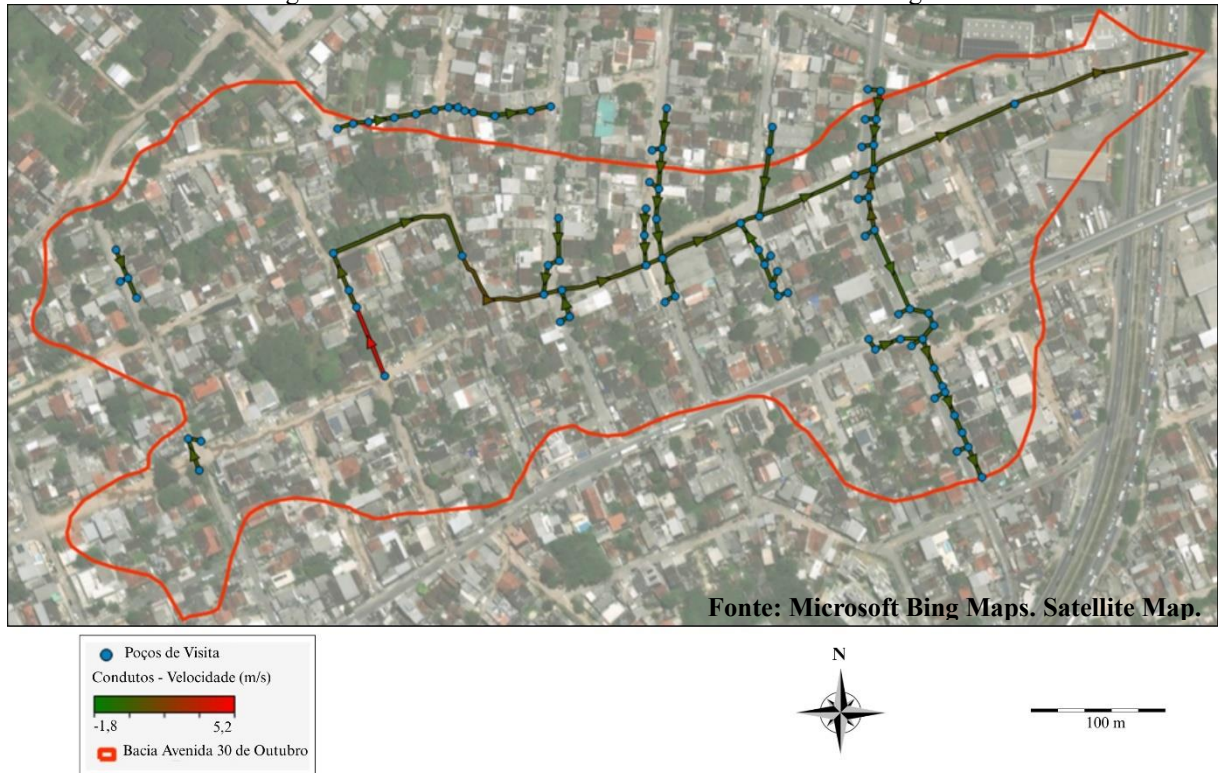
De forma análoga, Rodrigues (2021) encontrou os mesmos coeficientes R^2 , NSE e PBIAS, além de outros indicadores para avaliar um modelo hidrodinâmico do HEC-RAS na Bacia do Rio Frágoso em Olinda-PE, e observou-se que os resultados estatísticos foram satisfatórios, conforme valores recomendados pela literatura. No estudo mencionado foi obtido um R^2 de 0,777, NSE de 0,685 e PBIAS de 6,110% tendo desempenhos considerados como “Ótimo”, “Bom” e “Ótimo”, respectivamente.

4.3.2 Escoamento e mancha de inundação

Dentre as respostas que o modelo PCSWMM permite a visualização estão a espacialização dos parâmetros de escoamento pelos condutos e dispositivos hidráulicos (Poços de Visita), no 1D e na planície 2D.

A Figura 42 apresenta as velocidades nos condutos da drenagem urbana da área de estudo no dia 06 de fevereiro de 2025 às 14:00h, percebe-se que na maioria da rede a velocidade se mantém em 1,80 m/s, exceto em um trecho de alta declividade onde a velocidade máxima atingida é de 5,20 m/s, estando acima do recomendado por Oliveira e Oliveira (2016) que recomendam uma velocidade máxima para dispositivos de drenagem de concreto de 5,00 m/s.

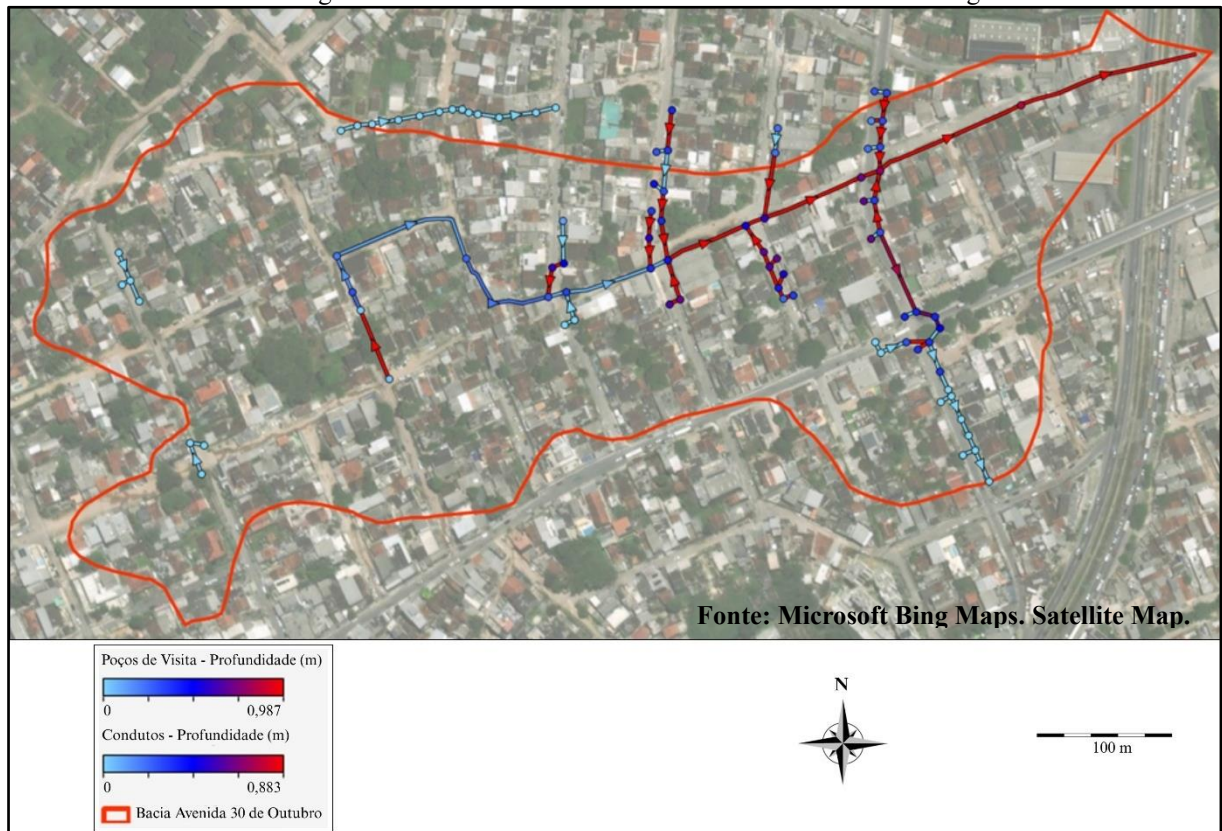
Figura 42: Velocidade do escoamento nos condutos da drenagem.



Fonte: O Autor (2025).

Em relação as profundidades atingidas nos condutos e dispositivos da drenagem, a partir da Figura 43, nota-se que nos poços de visita do modelo a altura máxima atingida foi de 0,987m e nos condutos de 0,883m, também é possível visualizar os trechos mais vulneráveis ao aumento excessivo dos níveis de água em momento crítico do dia 06 de fevereiro de 2025 às 14:00h.

Figura 43: Profundidade do escoamento nos condutos da drenagem.



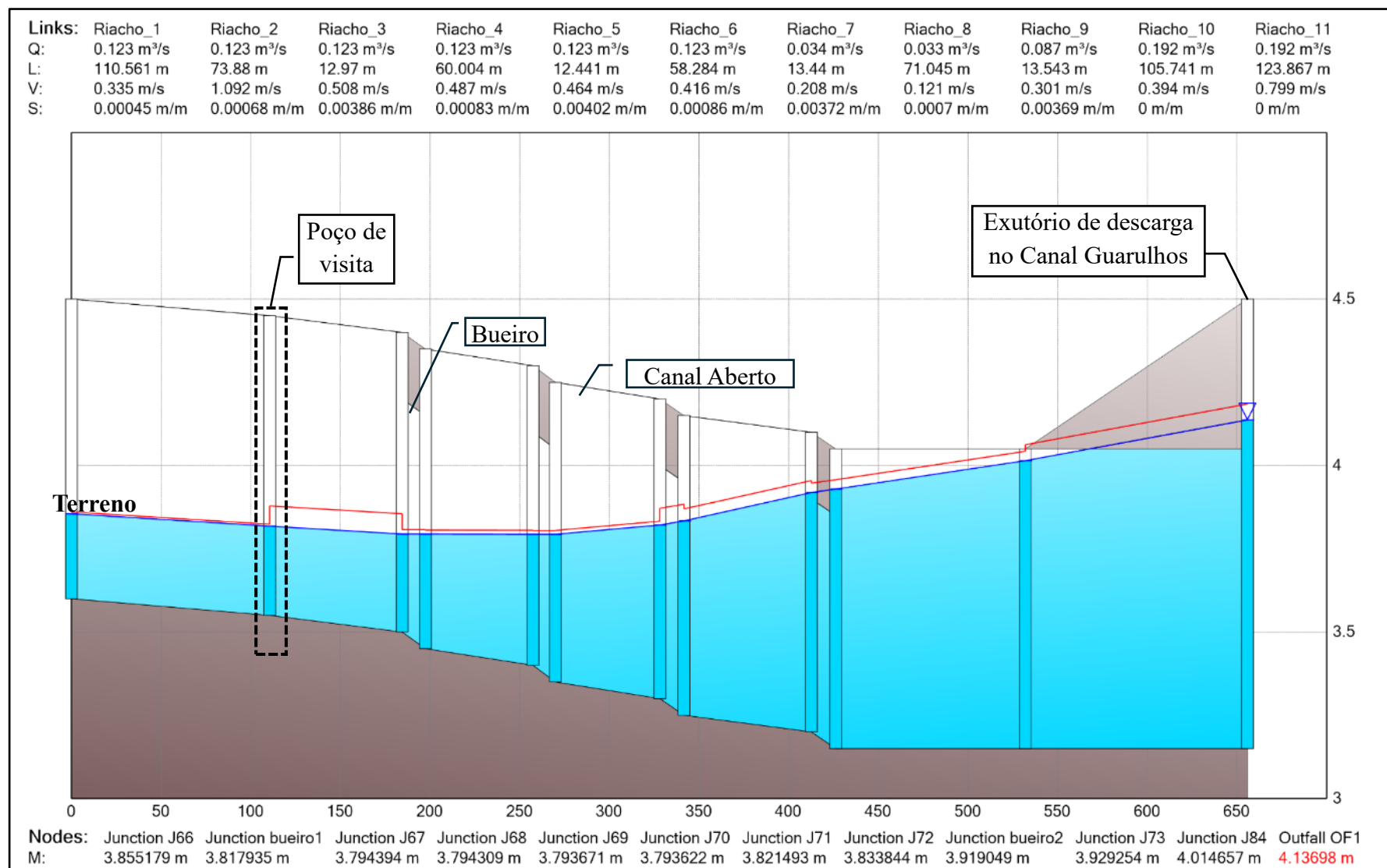
Fonte: O Autor (2025).

Durante o processo de modelagem, observou-se inconsistências nos resultados antes da inserção dos dados referentes ao nível de água do canal Guarulhos. Diante disso, levantou-se a hipótese de que o canal exerceria influência sobre o riacho, uma vez que, durante o evento, foram visualizados níveis elevados tanto no canal Guarulhos quanto no rio Jiquiá, (Figura 24). Tentou-se, ainda, visualizar a saída do riacho 30 de Outubro, porém a densa vegetação impediu a observação, como mostrado na Figura 28. Assim, adotou-se como condição de contorno de jusante, a curva de nível da água do canal, o que gerou resultados mais coerentes com as observações de campo.

Após a inserção da condição de contorno de jusante, identificou-se que os níveis do Canal Guarulhos superam a elevação do deságue do riacho, provocando o efeito de remanso devido ao “afogamento” do exutório. O remanso ocorre quando a vazão de montante é reduzida pelo represamento de jusante e consequentemente eleva o nível da água (Tucci, 2016).

A Figura 44 representa o perfil do riacho “30 de Outubro” no mesmo instante, onde o eixo horizontal indica a distância e o eixo vertical indica a elevação, ambos em metros. A partir da Figura 43 e Figura 44, é possível observar que o riacho 30 de Outubro apresenta mais da metade da sua extensão com níveis críticos de profundidade.

Figura 44: Perfil longitudinal do Riacho “30 de Outubro” no dia 06/02/2025 às 14:00h.



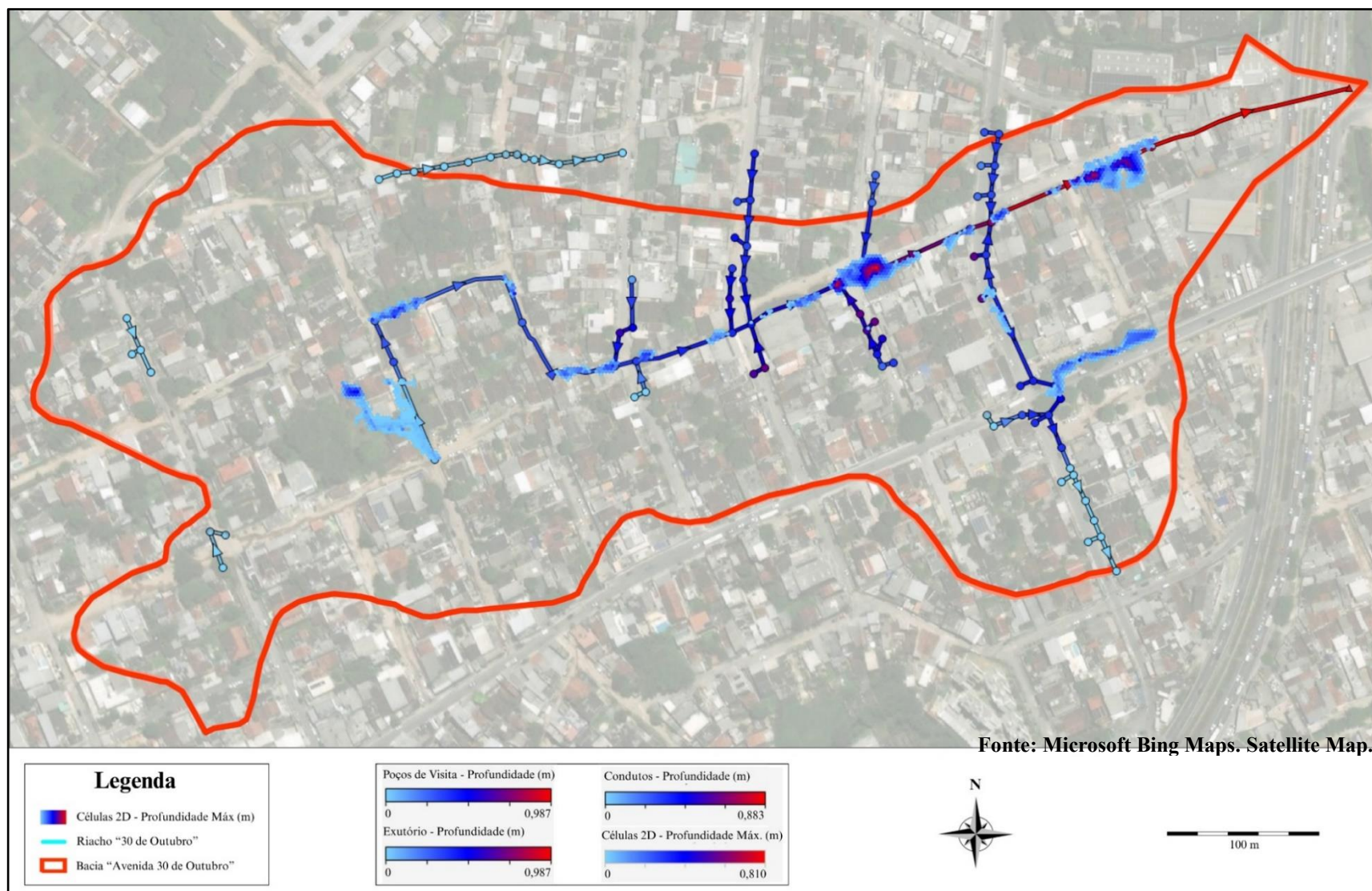
Fonte: O Autor (2025).

Dessa forma, é possível constatar que o riacho 30 de Outubro sofre influência direta dos níveis do canal Guarulhos, as grandes profundidades ocorrem devido a restrição da descarga no deságue do riacho no nó exutório, no modelo. Consequentemente, todos os trechos a jusante do riacho apresentam a cor vermelha (Figura 43) ilustrando as grandes profundidades aferidas. Isso configura um cenário de inundação que, agrava problemas de alagamento em regiões mais a montante pois os canais de drenagem das ruas adjacentes logo ficam cheios e começam a transbordar o volume excedente através dos dispositivos hidráulicos de entrada, como as Bocas de Lobo simples e Bocas-de-Lobo com grelha identificadas na área.

Nesse contexto, a água tem dificuldade de sair da bacia, dependendo então dos níveis do canal Guarulhos e do rio Jiquiá diminuírem a uma altura suficiente para proporcionar o escoamento por gravidade da água do riacho até seu deságue.

Observa-se na Figura 45 a mancha de inundação associada a profundidade do escoamento na drenagem 1D representando a relação direta entre as profundidades do escoamento calculadas e as áreas de cheia para o evento analisado.

Figura 45: Mapa da mancha de inundação com a drenagem para o evento de precipitação intensa em 06/02/2025, às 14:00h.



Fonte: O Autor (2025).

5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa diagnosticou os pontos críticos do sistema de drenagem pluvial da bacia Avenida 30 de Outubro através da modelagem hidrodinâmica no PCSWMM com a simulação de um evento específico de chuva intensa, com dados comparados por medições e visitas em campo.

A bacia Avenida 30 de Outubro é uma região densamente ocupada e com alta taxa de impermeabilidade, onde a expansão urbana sem planejamento não considerou a hidrografia local. Assim, hoje a área sofre com problemas tanto de inundação como de alagamentos. Foram identificadas diversas interferências na rede de drenagem da região, o descarte de resíduos e lançamento de poluentes, principalmente no riacho 30 de Outubro. Fatos esses, que favorecem a ocorrência de inundações e alagamentos, assim como, oferece risco a saúde pública e qualidade de vida dos moradores.

As limitações de dados detalhados da rede de drenagem e levantamento topográfico dificultaram a representação da rede no modelo. Dessa forma, o cadastro da rede de drenagem precisa ser continuamente atualizado e ajustado, como as elevações dos dispositivos de microdrenagem, a seção e declividade dos canais e bueiros.

Foi constatado também, muitos pontos de assoreamento avançado em trechos do riacho 30 de Outubro, indicando que o escoamento da região transporta sedimentos provenientes de terrenos não protegidos e que estão sofrendo efeitos de erosão. Dessa forma, enfatiza-se a importância da manutenção e limpeza contínua dos canais.

A modelagem integrada 1D e 2D representou bem a dinâmica da rede de drenagem urbana, pois permitiu a avaliação do escoamento primeiramente dentro dos condutos, e com o avanço da chuva, o aumento da vazão e a saturação da rede, visualizou-se o extravasamento da água, alagando a Avenida 30 de outubro e ruas adjacentes.

O exutório da bacia é impactado pelo efeito da cheia do canal Guarulhos e do rio Jiquiá, provocando o fenômeno de remanso no riacho 30 de Outubro. Diante disso, ocorre uma influência no restante da rede de drenagem conectada ao riacho, inundando a Avenida 30 de Outubro e ruas adjacentes. Particularmente a região do cruzamento da Rua Leandro Barreto e a Rua Lorena, onde é possível existir uma depressão a jusante do ponto de encontro da drenagem da Rua Lorena com o riacho 30 de Outubro, fazendo com que o efeito de remanso direcione o fluxo de escoamento a sudeste até ao local próximo do viaduto da Rua Leandro Barreto.

A área de estudo demonstra potencial de aplicação de técnicas LIDs, oferecendo oportunidades para estratégias de revitalização mediante a implementação de soluções integradas e sustentáveis.

De modo geral, conclui-se que a modelagem hidrodinâmica no PCSWMM se mostrou como uma ferramenta efetiva para verificação do funcionamento da rede, possibilitou a realização da análise das condições hidráulicas e apresentou bom desempenho para a base de dados utilizada.

O uso do PCSWMM otimizou o processo de modelagem, oferecendo agilidade e facilidade de interpretação graças à sua interface intuitiva e recursos interativos. A ferramenta proporciona resultados claros e versáteis, com possibilidade de exportação em múltiplos formatos, demonstrando a vantagem de utilizar um software especializado.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

A presente pesquisa procurou abranger o máximo de aspectos relacionados ao tema da drenagem urbana e modelagem hidrodinâmica, contudo, há tópicos que permanecem em aberto para discussão. É possível a realização da validação do modelo construído a partir de outro evento de chuva intensa, e a simulação de cenários para chuvas com diferentes tempos de retorno, que apresentem novas manchas de inundação para eventos de maior gravidade.

Também, o mapeamento de áreas de risco para suporte na resposta emergencial em crises e a aplicação das técnicas LIDs por meio das ferramentas disponíveis no modelo PCSWMM, estudando parâmetros e visualizando cenários onde soluções integradoras e sustentáveis de drenagem exercem impacto positivo e atuam na solução dos problemas de inundações e alagamentos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas. In: **XV Encontro Nacional de Águas Urbanas (ENAU) e V Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos (SRRU)**, 2024, Recife. Apresentação de Slides. Recife, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Curva Número na Base Ottocodificada (1985, 2014 e 2022). 2018. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/d1c36d85-a9d5-4f6a-85f7-71c2dc801a67>. Acesso em: 27 fev. 2025.

ARAUJO, D. C. S. et al. Analysis of climate change scenarios using CMIP6 models in Pernambuco, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB)**, v. 59, p. 1-12, 2024.

BAGHERI, K.; REQUIERON, W.; TAVAKOL-DAVANI, H. A comparative study of 2-dimensional hydraulic modeling software, case study: Sorrento Valley, San Diego, California. **Journal of Water Management Modeling**, v. 28, p. C471, 2020. DOI: 10.14796/JWMM.C471.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n. 16, de 8 de dezembro de 1990. Dispõe sobre a classificação de corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 dez. 1990.

BRASIL. Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei n. 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei n. 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

BRASIL. Lei n. 9.984, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas – ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 jul. 2000.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº

6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 8 jan. 2007.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o Marco Legal do Saneamento Básico e altera as Leis nº 9.984, de 17 de julho de 2000, nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, nº 11.107, de 6 de abril de 2005, e nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 16 jul. 2020.

CALDEIRA, L. A. C.; LIMA, D. P. Drenagem urbana: uma revisão de literatura. **Engineering Sciences**, v. 8, n. 2, p. 1-9, 2020.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. Oficina de Textos, 2005. 302 p.

CAPUTO, Û. K.; MOURA, P. Instrução Técnica para Elaboração de Estudos e Projetos de Drenagem de Belo Horizonte. In: **XV Encontro Nacional de Águas Urbanas V Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos**, 2024.

CARDOSO, M. A. Avaliação do desempenho de sistemas de drenagem urbana. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2008. 373 p. (Teses e Programas de Investigação, TPI 50). Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa.

CHOUDHURY, N. Y.; POUL, A.; POUL, B. K. Impact of coastal embankment on the flash flood in Bangladesh: a case study. **Applied Geography**, v. 24, p. 241-258, 2004.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. 2. imp. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2015. 336 p. (Coleção ABRH; 12).

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS (CNM). **Desastres obrigam mais de 4,2 milhões de pessoas que foram negligenciadas pelas políticas públicas a buscarem alternativas de moradia nos últimos dez anos**. Brasília, DF: CNM, 26 jul. 2023. Disponível em: <https://cnm.org.br/comunicacao/noticias/desastres-em-47-dos-municipios-forcaram-mais-de-4-2-milhoes-a-deixarem-suas-casas-nos-ultimos-10-anos>. Acesso em: 1 dez. 2024.

COSTA, M. E. L. Monitoramento e modelagem de águas de drenagem urbana na bacia do lago Paranoá. 2013. xxiv, 179 f., il. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CRUZ, M. A. S.; SOUZA, C. F.; TUCCI, C. E. Controle da drenagem urbana no Brasil: avanços e mecanismos para sua sustentabilidade. **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, n. 51, p. 1-18, 2007.

DA SILVA, A. C.; LOPES, L. S. de O.; DA SILVA, J. C. B. Desastres naturais e percepção de risco da população: um estudo de caso da inundação em Palmares–PE em 2010. **Revista de Geografia (Recife)**, Recife, v. 33, n. 2, p. 112–128, 2016.

DAWOUD, O.; ELJAMASSI, A.; ABUNADA, Z. Mapping and quantification of soil erosion and sediment delivery in poorly developed urban areas: a case study. **Sustainability**, [S.l.], v. 15, n. 18, p. 1–28, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151813683>.

DE ALENCAR, A. K. B. Crescimento urbano x Assentamentos precários: a continuidade de processos insustentáveis. **Revista movimentos sociais e dinâmicas espaciais**, v. 3, n. 1, p. 148-167, 2014.

DE BRITO SOUSA, M. C. et al. Uso de telhados verdes para controle de águas pluviais urbanas em Teresina–Piauí. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 38, n. 2, 2021.

DE SOUZA, V. C. B. Gestão da drenagem urbana no Brasil: desafios para a sustentabilidade. **Revista eletrônica de gestão e tecnologias ambientais**, v. 1, n. 1, p. 58-72, 2013.

ENGENHARIA, SERVIÇOS E COMÉRCIO LTDA. Relatório de Caracterização da Área de Influência: Estudos de Concepção para Gestão e Manejo de Águas Pluviais e Drenagem Urbana do Recife. Recife: Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana – EMLURB, 2013.

FERRAZ, G. de F. **Estudo do HEC-RAS para escoamento em canais**. 2015. 101 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/46286>. Acesso em: 24 abr. 2024.

FONSECA NETO, G. C. da F., SILVA JUNIOR, M. A. B. da, RODRIGUES, A. B., NETO, A. R., & CABRAL, J. J. da S. P. Modelagem Bidimensional para a Verificação Hidráulica da Canalização de um Trecho do Rio Frágoso em Olinda (Pernambuco, Brasil). **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 13, n. 6, p. 2963–2977, nov. 2020. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.6.p2963-2977>

GOERL, R. F.; KOBİYAMA, M. Considerações sobre as inundações no Brasil. **XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, v. 3, 2005.

GÓES, V. C. **Simulação Hidrológico-Hidrodinâmica Integrada ao Geoprocessamento para Avaliação da Macrodrenagem em Centros Urbanos**. 2009. 170 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5007>. Acesso em: 20 out. 2024.

HAEFNER, J. W. **Modeling biological systems: principles and applications**. Springer Science & Business Media, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e Estados: palmares. Palmares. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/palmares.html>. Acesso em: 6 jan. 2024.

IPCC. Mudança Climática 2022: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade. Contribuição do Grupo de Trabalho II ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. **Cambridge: Cambridge University Press**, 2022. Relatório Técnico. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>. Acesso em: 6 jan. 2025.

JAMES, Rob; FINNEY, Karen; PERERA, Nandana; JAMES, Bill; PEYRON, Nelly. SWMM5/PCSWMM integrated 1D-2D modeling. In: DONIGIAN, A. S.; FIELD, Richard; MICHAEL BAKER JR., Inc. (ed.). Fifty years of watershed modeling: past, present and future. ECI Symposium Series, 2013. Disponível em: <http://dc.engconfintl.org/watershed/12>.

JAMES, W.; ROSSMAN, L. A.; JAMES, W. R. C. **User's guide to SWMM 5. 13th ed. Guelph**, Ontario: CHI, 2010.

JANSSEN, C. Manning's n values for various land covers to use for dam breach analyses by NRCS in Kansas. Kansas: Natural Resources Conservation Service (NRCS), 2016. 2 p.

JUNIOR, M. A. B. S; Alternativas Compensatórias para Controle de Alagamentos em Localidade do Recife-PE. 2015.

KUMAR, S.; KAUSHAL, D. R.; GOSAIN, A. K. Evaluation of evolutionary algorithms for the optimization of storm water drainage network for an urbanized area. **Acta Geophysica**, [s. l.], v. 67, n. 1, p. 149–165, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11600-018-00240-8>.

LEGATES, D. R.; MCCABE, G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, [S.L.], v. 35, n. 1, p. 233-241, jan. 1999. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/1998wr900018>.

MARENGO, J. A. et al. 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**, [S. l.], v. 39, p. 100545, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100545>. Acesso em: 5 out. 2023.

MARENGO, J. A. et al. 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.

MESQUITA, V. T. de; SILVA, M. E. de O.; COSTA, M. E. L.; ALMEIDA, D. N. de; KOIDE, S. **Implementação de melhorias no sistema de drenagem da Ceilândia - DF**. In: XV Encontro Nacional de Águas Urbanas e V Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos, 2024.

MUNIR, B. A.; AHMAD, S. R.; HAFEEZ, S. (2020). Integrated Hazard Modeling for Simulating Torrential Stream Response to Flash Flood Events. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, 9(1), 1. <https://doi.org/10.3390/ijgi9010001>

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

NAT4WAT. Natural Solutions for Water Management. Barcelona: ICRADev, 2024. Disponível em: <https://nat4wat.icradev.cat>. Acesso em: 23 abr. 2025.

NOGUEIRA, F. F.; MARTINS, J. R. S.; LUCCI, R. M.; PEREIRA, M. C. S.; SILVA, F. P. da. **Avaliação de sistemas de macrodrenagem costeiros sob condições extremas combinadas de chuva e maré**. In: XII Encontro Nacional de Águas Urbanas, 2018.

NRCS-KANSAS. Manning’sn Values for Various Land Covers To Use for Dam Breach Analyses by NRCS in Kansas. Manhattan, KS: Natural Resources Conservation Service, 2016. (Adotada por Curtis Janssen, State Conservation Engineer, em julho de 2016).

OLIVEIRA, M. O.; OLIVEIRA, T. de S. **Curso de drenagem urbana e controle de inundações**. Campo Grande: Tema - Engenharia e Arquitetura e Senge Ms - Sindicato dos Engenheiros de Mato Grosso do Sul, 2016.

PEARSON, K. LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. **The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science**, v. 2, n. 11, p. 559-572, 1901.

PERNAMBUCO (2016). Programa Pernambuco Tridimensional. Disponível em: <http://www.pe3d.pe.gov.br/> Acesso em: 20 de ago. de 2024.

PORTO ALEGRE (Município). Lei Complementar nº 434, de 1º de dezembro de 1999. Dispõe sobre o desenvolvimento urbano no Município de Porto Alegre, institui o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental de Porto Alegre e dá outras providências. Diário Oficial de Porto Alegre, Porto Alegre, 1 dez. 1999. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/rs/p/porto-alegre/lei-complementar/1999/44/434/lei-complementar-n-434-1999-dispoe-sobre-o-desenvolvimento-urbano-no-municipio-de-porto-alegre-institui-o-plano-diretor-de-desenvolvimento-urbano-ambiental-de-porto-alegre-e-da-outras-providencias>. Acesso em: 6 jan. 2025.

PREFEITURA DO RECIFE. **Prefeitura do Recife renova estágio de Alerta Máximo**. Prefeitura do Recife, Recife, 5 fev. 2025. Disponível em: <https://www2.recife.pe.gov.br/noticias/05/02/2025/prefeitura-do-recife-renova-estagio-de-alerta-maximo>. Acesso em: 13 mar. 2025.

PREFEITURA, DE BELO HORIZONTE. "Instrução Técnica para Elaboração de Estudos e Projetos de Drenagem Urbana do Município de Belo Horizonte." Belo Horizonte (2022).

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA (2023). Casa Civil. Secretaria Especial de Articulação e Monitoramento. Secretaria Adjunta VI -Recursos Hídricos. **Nota Técnica nº 1/2023/SADJ-VI/SAM/CC/PR**.

RECIFE (Município). Relatório do diagnóstico do sistema de drenagem existente: elaboração dos estudos de concepção para gestão e manejo de águas pluviais e drenagem urbana do Recife: contrato nº 6.016/2012. Paulista (PE): ABF Engenharia, 2013. 333 p.

RIO GRANDE DO SUL. Defesa Civil. Governo do Estado Rio Grande do Sul. Defesa Civil atualiza balanço das enchentes no RS – 20/8. 2024. Disponível em: <https://www.estado.rs.gov.br/defesa-civil-atualiza-balanco-das-enchentes-no-rs-20-8>. Acesso em: 6 jan. 2024.

RODRIGUES, A. B. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de inundações na Bacia do Fragoso – Olinda/PE. 2021. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade

Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2021.

RODRIGUES, A. B.; CABRAL, J. J. da S. Pe. **Simulação computacional da técnica microrreservatório de lote na bacia do Rio Fragoso em Olinda-Pernambuco**. In: XIV Encontro Nacional de Águas Urbanas e IV Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos, 2022.

RODRIGUES, H. B.; LIMA, W. A.; MENDES, L. A. Impactos das obras de drenagem e da urbanização no desempenho hidráulico de um canal em Aracaju/SE. **Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, n. 57, p. 121-133, 2021.

ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C. Storm Water Management Model Reference Manual: Volume I – Hydrology (Revised). Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, 2016. 267 p. (EPA/600/R-16/093).

ROSSMAN, L. A.; SIMON, M. A. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.2. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, 2022. 324 p. (EPA/600/R-22/030).

SANTOS, K. A.; RUFINO, I. A. A.; BARROS, M. N. M. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande-PB. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, p. 943-952, 2017.

SCHUELER, T. R. et al. **Controlling urban runoff: A practical manual for planning and designing urban BMPs**. Washington, DC: Metropolitan Washington Council of Governments, 1987.

SIDEK, L. M. et al. Application of PCSWMM for the 1-D and 1-D–2-D modeling of urban flooding in Damansara Catchment, Malaysia. **Applied Sciences**, v. 11, n. 19, p. 9300, 2021.

SILVA, D. F. et al. Drenagem e manejo de águas pluviais no Brasil: conceitos, gestão e estudos de caso. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 21, n. 2024, 2024.

SILVA, R. T.; PORTO, M. F. do A. Gestão urbana e gestão das águas: caminhos da integração. **Estudos avançados**, v. 17, p. 129-145, 2003.

SILVA, T. A. da. **Modelagem hidráulica do canal do rio granjeiro, Crato/CE, utilizando o programa computacional HEC-RAS**. 2013. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional em Gestão de Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/11337>. Acesso em: 24 abr. 2024.

TRAJANO, M. C. **Apac emite alerta laranja para chuvas intensas em Pernambuco; veja orientações.** Jornal do Commercio, Recife, 4 fev. 2025. Disponível em: <https://jc.uol.com.br/pernambuco/2025/02/04/apac-emite-alerta-laranja-para-chuvas-intensas-em-pernambuco-veja-orientacoes.html>. Acesso em: 13 mar. 2025.

TUCCI, C. E. M. **Água no meio urbano.** In: Água Doce. Porto Alegre: UFRGS, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas.** Programa de Modernização do Setor Saneamento, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos.** 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M. Regulamentação da drenagem urbana no Brasil. **Revista de Gestão de água da América Latina**, v. 13, n. 1, p. 29-42, 2016.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (orgs.). **Inundações Urbanas na América do Sul.** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

TUCCI, Carlos E. M. et al. **Drenagem Urbana.** Porto Alegre: Abrh/Editora da Universidade/Ufrgs, 1995.

TUNDISI, J. G. Novas perspectivas para a gestão de recursos hídricos. **Revista USP**, n. 70, p. 24-35, 2006.

UN-HABITAT. **World Cities Report 2024: Cities and Climate Action.** Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, 2024. Disponível em: <https://unhabitat.org/wcr/>. Acesso em: 13 janeiro 2025.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada.** Editora McGraw-Hill do Brasil, 1975.

WAYCARBON; ICLEI; PREFEITURA MUNICIPAL DO RECIFE. Análise de riscos e vulnerabilidades climáticas e estratégia de adaptação do município do Recife – PE: resumo para tomadores de decisão. Recife: WayCarbon, 2019. Relatório Técnico.

WORLD BANK. THE GLOBAL WATER PARTNERSHIP. Washington, DC: World Bank, 2010. 153 p.

**ANEXO A – TABELAS DE COEFICIENTES DE RUGOSIDADE DE MANNING E
ARMAZENAMENTO EM DEPRESSÕES**

Valores de Coeficiente de Manning (n) para Diferentes Coberturas do Solo

Para uso em análises de ruptura de barragens pelo NRCS no Kansas. Adotado em 12/07/2016 por Curtis Janssen, SCE (Engenheiro de Conservação do Estado) - Revisado pelo PAC

Valor NLCD	Valor padrão <i>n</i> Manning	Intervalo de <i>n</i> Manning	Definição de referência da Cobertura do Solo
11	0,040	0,025–0,05	Superfície de água — Todas as áreas com superfície de água, geralmente com menos de 25% de vegetação ou solo.
21	0,040	0,03–0,05	Áreas Desenvolvidas, Espaço Aberto — Áreas com mistura de materiais construídos e vegetação (gramados).
22	0,100	0,08–0,12	Áreas Desenvolvidas, Baixa Intensidade — Mistura de materiais construídos e vegetação.
23	0,080	0,06–0,14	Áreas Desenvolvidas, Média Intensidade — Áreas com maior densidade de construções.
24	0,150	0,12–0,20	Áreas Desenvolvidas, Alta Intensidade — Regiões altamente urbanizadas (residências/comércio).
31	0,025	0,023–0,030	Terreno Árido (Rocha/Areia/Argila) — Áreas sem vegetação significativa.
41	0,160	0,10–0,16	Floresta Decídua — Áreas com árvores >5m, >75% perdem folhas sazonalmente.
42	0,160	0,10–0,16	Floresta Perene — Árvores >5m, >75% mantêm folhas o ano todo.
43	0,160	0,10–0,16	Floresta Mista — Nem decíduas nem perenes excedem 75% da cobertura.
52	0,100	0,07–0,16	Arbustos/Vegetação Rasteira — Dominados por arbustos <5m ou árvores jovens.
71	0,035	0,025–0,050	Pastagem/Herbáceas — Vegetação herbácea (>80% de cobertura).
81	0,030	0,025–0,050	Pastagem/Campo de Feno — Gramíneas/leguminosas para pasto ou feno (>20% de cobertura).
82	0,035	0,025–0,050	Cultivos Agrícolas — Áreas de produção como milho, soja, pomares.
90	0,120	0,045–0,15	Áreas Alagáveis com Vegetação Lenhoza — Florestas/arbustos com solo saturado.
95	0,070	0,05–0,085	Áreas Alagáveis com Vegetação Herbácea — Herbáceas (>80% de cobertura, solo saturado).

Fonte: Adaptado de NRCS-Kansas (2016).

Armazenamento em Depressões

Superfícies Impenetráveis	1,27 – 2,54 mm
Gramados	2,54 – 5,08 mm
Pastagem	5,08 mm
Serrapilheira	7,62 mm

Fonte: Adaptado de Rossman et al. (2022), ASCE, (1992). Design & Construction of Urban Stormwater Management Systems, New York, NY.

Coeficiente n de Manning - Escoamentos à Superfície Livre

Superfície	n
Asfalto liso	0,011
Concreto liso	0,012
Concreto normal	0,013
Madeira	0,014
Tijolo com cimento	0,014
Cerâmica	0,015
Ferro fundido	0,015
Tubos de metal ondulado	0,024
Cimento com superfície de pedregulho	0,024
Solo em pousio	0,05
Solos cultivados	
• Cobertos de resíduos < 20%	0,06
• Cobertos de resíduos > 20%	0,17
Campo (natural)	0,13
Gramma	
• Curta, pradaria	0,15
• Densa	0,24
• Gramma-bermudas	0,41
Floresta	
• Vegetação rasteira leve	0,40
• Vegetação rasteira densa	0,80

Fonte: Adaptado de Rossman et al. (2022), McCuen, R. et al. (1996), Hydrology, FHWA-SA-96-067, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Coeficiente n de Manning - Condutos Fechados

Material	Manning n
Tubulação cimento-amianto	0,011 - 0,015
Tijolo	0,013 - 0,017
Tubulação de ferro Cimento forrado e revestido	0,011 - 0,015
Concretos (Monolítico)	
• Formas lisas	0,012 - 0,014
• Formas rugosas	0,015 - 0,017
Tubulação de concreto	0,011 - 0,015
Tubulação de metal corrugado (1/2-pol x 2-2/3-pol ranhuras)	
Liso	0,022 - 0,026
Ranhuras inversas	
	0,018 - 0,022
Revestimento asfáltico	0,011 - 0,015
Tubulação plástica (lisa)	0,011 - 0,015
Cerâmico	
Tubos	0,011 - 0,015

Fonte: Adaptado de Rossman et al. (2022), ASCE (1982). Gravity Sanitary Sewer Design and Construction, ASCE Manual of Practice No. 60, New York, NY.

Coeficiente n de Manning – Canais Abertos

Tipo de Canal	Manning n
Canais Revestidos	
• Asfalto	0,013 - 0,017
• Alvenaria	0,012 - 0,018
• Concreto	0,011 - 0,020
• Pedregulho ou enrocamento	0,020 - 0,035
• Vegetal	0,030 - 0,40
Escavado ou dragado	
• Terra, reto e uniforme	0,020 - 0,030
• Terra, sinuoso, razoavelmente uniforme	0,025 - 0,040
• Rocha	0,030 - 0,045
• Sem manutenção	0,050 - 0,140
Canais naturais (curso de água pequeno com largura máxima de inundação < 100 pés)	
• Seção razoavelmente regular	0,030 - 0,070
• Seção irregular com represamento	0,040 - 0,100

Fonte: Adaptado de Rossman et al. (2022), ASCE (1982). Gravity Sanitary Sewer Design and Construction, ASCE Manual of Practice No. 60, New York, NY.