



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PEDRO HENRIQUE CAMPOS DE SOUZA BARBOSA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE BACIA DE DETENÇÃO NA REDUÇÃO DE  
LAGAMENTOS URBANOS EM RECIFE (PE)**

Recife

2025

**PEDRO HENRIQUE CAMPOS DE SOUZA BARBOSA**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE BACIA DE DETENÇÃO NA REDUÇÃO DE  
ALAGAMENTOS URBANOS EM RECIFE (PE)**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal  
de Pernambuco, como requisito parcial  
para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. D.Sc. Sylvana Melo dos Santos

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. M.Sc. Haylla Rebeka de Albuquerque Lins Leonardo

Recife

2025

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

Barbosa, Pedro Henrique Campos de Souza.

Avaliação da eficiência de bacia de detenção na redução de alagamentos urbanos em Recife (PE) / Pedro Henrique Campos de Souza Barbosa. - Recife, 2025.

74 p. : il., tab.

Orientador(a): Prof<sup>a</sup> D.Sc. Sylvana Melo dos Santos

Cooorientador(a): Prof<sup>a</sup>. M.Sc. Haylla Rebeka de Albuquerque Lins Leonardo

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

Inclui referências, apêndices.

1. Engenharia Civil e Ambiental. 2. Drenagem Urbana. 3. Técnicas Compensatórias. 4. Bacia de detenção. 5. Modelagem Hidrológica. I. Santos, Prof<sup>a</sup> D.Sc. Sylvana Melo dos . (Orientação). II. Leonardo, Prof<sup>a</sup>. M.Sc. Haylla Rebeka de Albuquerque Lins. (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:** PEDRO HENRIQUE CAMPOS DE SOUZA BARBOSA

**BANCA EXAMINADORA:**

**Orientador:** Profª. D.Sc. Sylvana Melo dos Santos

**Coorientador:** Profª. M.Sc. Haylla Rebeka de Albuquerque Lins Leonardo

**Examinador 1:** Prof. D.Sc. Anderson Luiz Ribeiro Paiva

**Examinador 2:** Profª. M.Sc. Camila Oliveira de Britto Salgueiro

**TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:** Avaliação da Eficiência de Bacia de Detenção na Redução de Alagamentos Urbanos em Recife (PE).

**LOCAL:** Google Meet

**DATA:** 08/09/2025

**HORÁRIO DE INÍCIO:** 14:00h.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com NOTA: 9,5.

**1) (x) aprovado(s) (nota > = 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 = < 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 candidato.

Recife, 08 de setembro de 2025.

Orientadora: .....

Coorientadora: .....

Avaliador 1: .....

Avaliador 2: .....

Candidato: .....

**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.

Dedico este trabalho a minha mãe que me incentivou a ler, a meu pai que me ajudou com a tabuada, a minha vó que me ensinou a ter fé, a Dona Ivete que me ensinou o “segredo”, a Deus que foi, que é que sempre será.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente a Deus, pelo dom da vida e pela oportunidade de chegar até aqui. De fato, Ele tem me acompanhado neste percurso desde a primeira possibilidade de cursar uma graduação: em cada prova vestibular feita, na chama de esperança de mudar de cidade e iniciar um caminho que talvez nunca fosse percorrido, nos inúmeros desafios e noites de angústia quando pensei não ser capaz de chegar do outro lado do rio, em cada momento de privação e solidão. Foi a força motriz para que este trabalho fosse concluído.

Em segundo lugar agradeço a meus pais, Andrea e Cid, por terem me gerado e acreditado na minha astúcia de fazer tudo diferente. Com eles, todos os familiares que sonharam comigo e foram meus braços e pernas onde eu não conseguia chegar.

Aos meus amigos, que foram como gotas d'água na aridez da vida, toda a minha gratidão pelas palavras de conforto, pelo acolhimento, pela paciência quando eu não pude ser presente ou dar a devida atenção. Aqui menciono os jovens do Movimento dos Focolares e toda a comunidade por me ajudarem na vivência de uma vida mais plena e sustentada pelo amor recíproco.

A minha orientadora, Professora Sylvana Santos, que tive a honra de conhecer durante a graduação e me fazer encantar pelos Recursos Hídricos. É desse tipo de pessoa que o mundo precisa, que faz o seu ofício com brilho nos olhos e com leveza. Gratidão por ter aceitado me orientar e por me encorajar a não desistir. A Professora Haylla Leonardo, que conheci ainda como estudante, meus agradecimentos, carinho e respeito pela grande profissional que se tornou e pela disposição sempre ativa em ajudar.

A Luís, pelo apoio, ternura e presença constante ao longo do processo de escrita deste trabalho. Enfim, a todos que direta ou indiretamente ajudaram para tornar possível esse sonho.

## **RESUMO**

O processo de urbanização, aliado ao aumento da impermeabilização do solo, tem reduzido a capacidade de infiltração e intensificado o escoamento superficial, ampliando a suscetibilidade a alagamentos, especialmente em áreas de planície, como no município do Recife (PE). Nesse cenário, técnicas compensatórias de drenagem vêm sendo incorporadas ao planejamento urbano com o objetivo de mitigar tais problemas por meio da infiltração e do armazenamento temporário das águas pluviais. Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de uma bacia de detenção na redução de alagamentos em área urbana de Recife, utilizando modelagem hidrológica no *Storm Water Management Model* (SWMM). A seleção da área crítica de estudo considerou três critérios: expansão da área construída entre 2013 e 2024, registros históricos de precipitações extremas e dados de alagamentos fornecidos pela Prefeitura do Recife, delimitados pelas Regiões Político-Administrativas (RPAs). A área foi caracterizada a partir de Modelo Digital do Terreno (MDT), processado no software QGIS, que permitiu a delimitação da microbacia de drenagem e a determinação das direções de fluxo. No SWMM, foram simulados dois cenários: (i) condições atuais de urbanização; e (ii) implantação de uma bacia de detenção no lote selecionado. Os resultados indicaram que, no cenário atual, o pico de vazão no exutório alcançou 1361,18 L/s, enquanto no cenário com a bacia de detenção esse valor foi reduzido para 510,39 L/s, observando-se ainda diminuição do escoamento nos trechos e controle da inundação nos nós. A estrutura projetada, com capacidade de 1121,25 m<sup>3</sup>, utilizou apenas 27% de seu volume. Dessa forma, os resultados demonstram a eficácia da adoção de técnicas compensatórias de drenagem, como as bacias de detenção, na mitigação do escoamento superficial e na atenuação de alagamentos em áreas urbanas de planície, a exemplo do Recife, particularmente no bairro de Afogados.

**Palavras-chave:** Drenagem urbana; Bacia de detenção; Modelagem hidrológica.

## **ABSTRACT**

The process of urbanization, combined with increasing soil impermeabilization, has reduced infiltration capacity and intensified surface runoff, thereby increasing susceptibility to flooding, particularly in lowland areas such as the city of Recife (PE), Brazil. In this context, compensatory drainage techniques have been incorporated into urban planning in order to mitigate these problems by promoting infiltration and temporary storage of stormwater. This study aimed to evaluate the efficiency of a detention basin in reducing flooding in an urban area of Recife, through hydrological modeling using the Storm Water Management Model (SWMM). The selection of the critical study area was based on three criteria: expansion of built-up areas between 2013 and 2024, historical records of extreme precipitation events, and flood data provided by the Recife Municipality, organized by the Political-Administrative Regions (RPAs). The study area was characterized using a Digital Terrain Model (DTM) processed in QGIS, which enabled the delimitation of the drainage sub-basin and flow directions. Two scenarios were simulated in SWMM: (i) current urbanization conditions; and (ii) implementation of a detention basin in the selected lot. Results indicated that, under current conditions, peak discharge at the outlet reached 1361.18 L/s, while with the detention basin this value was reduced to 510.39 L/s, along with decreases in runoff within the drainage network and control of nodal flooding. The designed basin, with a capacity of 1121.25 m<sup>3</sup>, used only 27% of its volume. These findings demonstrate the effectiveness of compensatory drainage techniques, such as detention basins, in mitigating surface runoff and reducing flooding in urban lowland areas, as exemplified by Recife, particularly in the neighborhood of Afogados.

**Keywords:** Urban drainage; Detention basin; Hydrological modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Ilustração esquemática dos conceitos de canalização e reservação da água da chuva.....	20
Figura 2 –	Configuração dos reservatórios em ruas.....	21
Figura 3 –	Perfis das trincheiras de infiltração .....	23
Figura 4 –	Esquema típico de uma bacia de detenção.....	24
Figura 5 –	Parque alagável entre os bairros de Areias e do Ipsep (Recife/PE).....	26
Figura 6 –	Mapa com divisão das Regiões Político-Administrativas (RPA) do Recife .....	32
Figura 7 –	Fluxograma da metodologia para processamento do índice NDBI .....	34
Figura 8 –	Localização dos postos pluviométricos do Recife .....	36
Figura 9 –	Fluxograma da metodologia para obtenção da microbacia hidrográfica de estudo.....	39
Figura 10 –	Processamento do NDBI para os anos de 2013 e 2024 no Recife.....	43
Figura 11 –	Comparação entre o NDBI de 2024 e Imagem de Satélite (Google Earth) de 2025 no Recife.....	44
Figura 12 –	Uso e ocupação do solo em Recife em 2013 e 2023.....	45
Figura 13 –	Precipitação diária máxima em Recife, em 2024.....	46
Figura 14 –	Área de estudo, bairro de Afogados, na RPA 5.....	51
Figura 15 –	Localização da microbacia de estudo e exutório no bairro de Afogados.....	52
Figura 16 –	Detalhamento das áreas de contribuição das sub-bacias.....	53
Figura 17 –	Relatório de estado da simulação da rede sem bacia de detenção.....	55
Figura 18 –	Simulação da rede de drenagem no SWMM no instante de 30 minutos.....	55
Figura 19 –	Hidrograma do exutório da rede sem bacia de detenção.....	56
Figura 20 –	Vazões nos nós inundados no instante de 30 minutos.....	57
Figura 21 –	Local de implantação da bacia de detenção.....	58

Figura 22 –	Planta baixa e vista da bacia de detenção projetada.....	59
Figura 23 –	Relatório de estado da simulação da rede com a bacia de detenção.....	60
Figura 24 –	Simulação da rede de drenagem no SWMM com a bacia de detenção no instante de 45 minutos.....	61
Figura 25 –	Hidrograma do exutório da rede com e sem bacia de detenção.....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Classificação dos instrumentos do sistema de drenagem urbana (SDU).....	17
Tabela 2 –	Parâmetros para avaliação de áreas vulneráveis a alagamentos (Recife/PE).....	31
Tabela 3 –	Lista dos bairros por Região Político-Administrativa.....	32
Tabela 4 –	Data das imagens, hora, ângulo de elevação do sol e ponto do satélite.....	33
Tabela 5 –	Dados dos postos pluviométricos utilizados no estudo.....	36
Tabela 6 –	Relação dos elementos de drenagem do Recife por RPA.....	37
Tabela 7 –	Cartas do Modelo Digital do Terreno (MDT) na região de Recife.....	38
Tabela 8 –	Valores típicos de armazenamento em depressões.....	39
Tabela 9 –	Coeficiente (n) de Manning – escoamento à superfície livre.....	40
Tabela 10 –	Valores de CN para bacias com ocupação urbana.....	41
Tabela 11 –	Intensidade da precipitação na área de estudo.....	42
Tabela 12 –	Crescimento da área construída (em Km <sup>2</sup> ) por Região Político-Administrativa (RPA) do Recife entre 2013 e 2023.....	45
Tabela 13 –	Número de eventos de precipitação diária máxima por Região Político-Administrativa (RPA) do Recife em 2024.....	47
Tabela 14 –	Número de pontos distintos de alagamento por Região Político-Administrativa (RPA) do Recife em 2024.....	48
Tabela 15 –	Parâmetros geométricos das sub-bacias, na área de estudo.....	53
Tabela 16 –	Cotas dos nós da rede de drenagem, na área de estudo.....	54
Tabela 17 –	Comprimento dos trechos da rede de drenagem, na área de estudo	54
Tabela 18 –	Vazão máxima nos trechos da rede sem bacia de detenção.....	56
Tabela 19 –	Vazão máxima e volume total nos nós inundados.....	57
Tabela 20 –	Vazões máximas nos trechos da rede com bacia de detenção.....	60

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	12
1.1	OBJETIVOS.....	14
1.1.1	<b>Objetivo geral.....</b>	14
1.1.2	<b>Objetivos específicos.....</b>	14
1.2	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO.....	14
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	16
2.1	DRENAGEM URBANA .....	16
2.2	TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS EM DRENAGEM.....	19
2.3	BACIAS DE DETENÇÃO.....	24
2.4	SENSORIAMENTO REMOTO COMO FERRAMENTA PARA A DRENAGEM URBANA.....	26
2.5	APLICAÇÃO DO SWWM NA MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA URBANA.....	29
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	31
3.1	IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS VULNERÁVEIS EM RECIFE.....	31
3.1.1	<b>Processamento das regiões com maior crescimento de área construída</b>	33
3.1.2	<b>Coleta de dados pluviométricos.....</b>	35
3.1.3	<b>Identificação dos pontos críticos de escoamento de águas pluviais....</b>	37
3.2	REDE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....	37
3.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O STORM WATER MANAGEMENT MODEL (SWMM).....	38
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	43
4.1	DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO PARA MODELAGEM HIDROLÓGICA	43
4.1.1	<b>Identificação da RPA crítica para o estudo.....</b>	43
4.1.2	<b>Caracterização da área de estudo.....</b>	50
4.2	VOLUME DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL GERADO ATUALMENTE....	54
4.3	DIMENSIONAMENTO DA BACIA DE DETENÇÃO.....	57
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	64
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	66
	<b>APÊNDICE A - PRECIPITAÇÃO DIÁRIA MÁXIMA EM RECIFE NO ANO DE 2024.....</b>	73

## 1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de desastres hidrometeorológicos corresponde a 25% dos desastres naturais registrados no Brasil entre 1990 a 2015. Na região nordeste esse percentual é de 21% no mesmo período, sendo superado pelos desastres relacionados à estiagem e seca (Moura *et al.*, 2016). Esses eventos resultam em impactos significativos para a população e para a infraestrutura urbana, tornando essencial à compreensão de suas causas e classificações.

De acordo com a Classificação e Codificação de Desastres Naturais – COBRADE (Brasil, 2012), os desastres hidrometeorológicos compreendem dois grupos: hidrológicos e meteorológicos. Esses eventos decorrem de fenômenos atmosféricos, hídricos ou climáticos, como inundações, deslizamentos de terra e tempestades. Em áreas urbanas, podem ocorrer de forma gradual devido às chuvas contínuas, ou de maneira abrupta, como inundações súbitas, enxurradas e alagamentos, resultando em danos à infraestrutura, perdas materiais e humanas, além de impactos na saúde pública (Moura *et al.*, 2016).

A vulnerabilidade da região Nordeste a esses eventos está associada à sua complexidade climática (Silveira *et al.*, 2024). Conforme Ab'Saber (2003), a região é influenciada pela interação entre sistemas atmosféricos regionais e fatores geográficos locais, o que resulta em uma ampla variação de tipos climáticos, desde tropicais úmidos até semiáridos.

Lacerda (2015) explica que essa variabilidade se reflete diretamente na distribuição irregular dos índices pluviométricos, com alternância entre anos secos, muito secos e chuvosos. Fatores como a flutuação da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) nos oceanos Pacífico e Atlântico, o fenômeno *El Niño* e a Oscilação Sul influenciam a precipitação interanual, determinando períodos de secas prolongadas ou chuvas intensas.

A região Nordeste apresenta uma alta variabilidade espacial e temporal da precipitação, modulada principalmente pela influência dos oceanos Atlântico e Pacífico (Gomes; Lima, 2021; Medeiros; Oliveira, 2021). Medeiros *et al.* (2021) destaca que, em geral, na região semiárida, o acumulado anual da precipitação é inferior a 800mm. No litoral e na porção noroeste, a precipitação anual varia de 1.200mm a 2.200mm (Rodrigues *et al.*, 2019; Luiz-Silva *et al.*, 2021).

A porção leste do Nordeste brasileiro, onde está situada a cidade do Recife, é caracterizada por um clima Litorâneo Úmido (Santana *et al.*, 2018). Diferente das outras porções do Nordeste, essa é influenciada por sistemas meteorológicos de diferentes escalas, com ventos provindos do oceano de forma recorrente (Souza Neto *et al.*, 2025), o que propicia a ocorrência de chuvas durante todo o ano.

Ademais, a cidade do Recife possui características físicas propícias à ocorrência de inundações e de alagamentos, considerando seu extenso território formado por planícies e regiões estuarinas, conforme Corrêa (2009), com grandes áreas de aterro do início de sua ocupação.

De forma geral, em diversas localidades e, inclusive, na cidade do Recife, com o aumento populacional desenfreado e o consequente avanço do processo de urbanização, os problemas descritos têm se tornado mais frequentes, interferindo na vida social, política e econômica do município e produzindo prejuízos a curto e longo prazo (Lima *et al.*, 2025). Entre esses prejuízos, destaca-se o frequente aparecimento de alagamentos decorrentes da alta taxa de impermeabilização do solo e da sobrecarga do sistema de drenagem existente.

Esse cenário é observado em muitas cidades brasileiras e é resultado de diversos fatores: falta de planejamento, uso inadequado do solo, ocupação de áreas de risco e sistemas de drenagem ineficientes (Santana *et al.*, 2018).

O planejamento da drenagem urbana incorpora novos conceitos, que vão além do escoamento da água, incluindo processos naturais como infiltração e evaporação. Nesse contexto, destaca-se a abordagem conhecida como Sistema de Drenagem Sustentável, que se baseia na aplicação de técnicas de controle na fonte (Narasimhan *et al.*, 2023), promovendo adaptações sustentáveis nas infraestruturas urbanas para mitigar os impactos da impermeabilização do solo.

Diversos estudos têm-se destacado na aplicação dessas técnicas de controle, chamadas também de técnicas compensatórias, dando ênfase aos reservatórios de detenção. Silva e Cabral (2014) simularam a implantação de reservatórios de detenção na bacia do canal de Sambra, na zona oeste do Recife, a partir de modelagem hidrológica, utilizando o software *Storm Water Management Model* (SWMM). As reduções das vazões no local para a simulação de reservatórios nos lotes, nas ruas ou a nível de bacia foram de 43%, 60% e 80%, respectivamente.

Diante do exposto, este estudo avalia o impacto da implantação de uma bacia de detenção em um bairro suscetível a alagamentos na cidade de Recife – PE, como solução compensatória dentro da Drenagem Urbana Sustentável. Para isso, serão empregadas ferramentas tecnológicas, como imagens de sensoriamento remoto e o *Storm Water Management Model* (SWMM), com o objetivo de subsidiar o planejamento da drenagem urbana da cidade.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a eficiência da implantação de uma bacia de detenção na diminuição do escoamento superficial em área crítica de alagamento, na cidade do Recife.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Delimitar a área crítica de estudo com base no crescimento da área construída, na análise de dados pluviométricos e nos registros históricos de alagamentos disponibilizados pela Defesa Civil do Recife;
- b) Avaliar a eficiência de uma bacia de detenção na redução do escoamento superficial por meio de simulação numérica.

## 1.2. JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Problemas com inundações são motivo de grande preocupação para a população que reside em áreas urbanizadas. Nos últimos anos, diversos eventos chuvosos mostraram quão despreparadas as cidades estão para comportar e drenar o volume de águas pluviais, muitas vezes fora do histórico de dados para o qual foram projetados os dispositivos de drenagem.

Erros nos processos de dimensionamento da infraestrutura de drenagem e no planejamento das cidades para a gestão das águas pluviais nas bacias hidrográficas podem contribuir para ineficiência do sistema (Silva; Cabral, 2014).

Além de demonstrar a aplicabilidade de ferramentas de sensoriamento remoto e de gestão das águas pluviais como apoio à tomada de decisão na construção de técnicas compensatórias de alagamentos, o presente trabalho também responde ao estabelecido na Lei Complementar nº 2 (Recife, 2021), que institui o Plano Diretor do Município do Recife. O Art. 66 dessa Lei prevê, entre os objetivos da Política Urbana de Saneamento, ações de drenagem que “contemplem a eliminação de alagamentos nas Zonas de Ambiente Construído”.

Diante da problemática dos alagamentos e de seus fatores intervenientes, observa-se que, nas últimas décadas, têm sido propostas novas abordagens para o manejo da drenagem urbana, com o uso de técnicas voltadas à recuperação do processo hidrológico natural, conforme discutido por Silva e Cabral (2014). Na prática, trata-se de dar condições que tornem a cidade resiliente para conviver com as águas (Diniz, 2022).

Percebe-se, portanto, a necessidade de um planejamento integrado da Política Municipal de saneamento ambiental, que considere as ferramentas tecnológicas e científicas disponíveis no que se refere às decisões e aos tipos de soluções a serem aplicadas, tanto de forma preventiva quanto corretiva, visando à otimização do sistema de drenagem das águas pluviais e à consequente redução dos danos humanos e materiais.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos que embasam o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente apresentam-se aspectos sobre o funcionamento dos sistemas de drenagem urbana. Em seguida, aborda-se as técnicas compensatórias de drenagem, destacando seu papel como alternativas sustentáveis para mitigar problemas recorrentes de alagamentos em áreas urbanas. Por fim são exploradas as ferramentas tecnológicas utilizadas no estudo, com ênfase no sensoriamento remoto e na modelagem hidrológica por meio do *Storm Water Management Model (SWMM)*.

### 2.1 DRENAGEM URBANA

O Dicionário Priberam da Língua Portuguesa define “sistema” como um “conjunto de meios e processos para alcançar um determinado fim” (Priberam, 2025). A versão *online* do Dicionário Michaelis apresenta, por sua vez, a ideia de “conjuntos de elementos distintos, com características e funções específicas, organizadas de forma natural ou por meios artificiais” (Michaelis, 2025). Entende-se, desse modo, que todo sistema corresponde a um conjunto de partes distintas e interdependentes, que contribuem para a realização de um objetivo comum.

Um Sistema de Drenagem Urbana (SDU) também pode ser entendido como um conjunto de medidas que visam mitigar os riscos e diminuir os prejuízos provocados pelas inundações. A necessidade desse tipo de sistema aparece devido às mudanças dos processos hidrológicos nas bacias hidrográficas, com padrões de precipitação imprevisíveis em decorrência das mudanças climáticas (Narasinhm, 2023), mas também da crescente urbanização que provoca a impermeabilização do solo e a diminuição da drenagem natural.

O SDU é, geralmente, dividido em três grupos de instrumentos: controle na fonte, microdrenagem e macrodrenagem. Na Tabela 1 são apresentados os grupos de instrumentos do sistema de drenagem urbana e seus elementos constituintes, conforme o Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais do Recife (Alencar et al., 2016)

Tabela 1 – Classificação dos instrumentos do sistema de drenagem urbana (SDU)

Grupo de instrumentos	Elementos do sistema
Controle na fonte	Medidas alternativas (jardins de chuva, bacias de detenção, pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração, reservatórios no lote)
Microdrenagem	Sarjetas, galerias, poços de visita, bocas de lobo, caixas de gaveta
Macrodrenagem	Rios, riachos e canais

Fonte: Autor (2025). Fonte dos dados: Alencar *et al.* (2016).

A importância do sistema de drenagem pode ser analisada sob duas perspectivas. Primeiramente, conforme Ramos, Barros e Palos (1999), o escoamento superficial ocorre independentemente da existência de um sistema artificial; contudo, é a eficiência desse sistema que determina seus impactos positivos ou negativos sobre a população. Em segundo lugar, a ausência ou ineficiência da drenagem pode resultar em desastres, como inundações em áreas de planície, deslizamentos em encostas, alagamentos, processos erosivos, assoreamento de rios e a disseminação de doenças de veiculação hídrica (Batista Filho, 2022).

Durante muitos anos, a forma de se pensar o planejamento e a gestão das águas pluviais era baseada no conceito higienista, amplamente difundido na Europa, principalmente devido a questões sanitárias. No âmbito da drenagem, consistia na criação de condutos subterrâneos que coletavam as águas de chuva a partir de outros elementos como sarjetas e caixas coletoras e as destinavam para rios ou riachos à jusante (Brito, 1909 *apud* Oliveira, Dantas e Cabral, 2022).

Segundo Faria (2015), no Brasil, isso ocorreu nas cidades litorâneas paralelamente à reestruturação urbana e à difusão de doenças contagiosas, representando uma passagem da cidade colonial para uma cidade moderna e higiênica.

Em Recife, o primeiro plano de saneamento foi elaborado pelo Engenheiro Saturnino de Brito por volta do século XX e contemplava apenas alguns bairros da região central da cidade. Oliveira Dantas e Cabral (2022, p. 140) aponta que entre 1940 e 1970 a população recifense aumentou em praticamente 1000%. Contudo, a organização da cidade e a criação de instrumentos legais para o ordenamento do território não seguiram o mesmo ritmo.

Neste sentido, a atenuação e o controle dos impactos da deficiência da drenagem urbana exigem um planejamento adequado do SDU, formalizado no Plano

Diretor de Drenagem Urbana (PDDU). Parkinson *et al.* (2003) definem o PDDU como um conjunto de diretrizes para a gestão do sistema de drenagem, em conformidade com as normas urbanísticas municipais e os instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997). Tucci (2002) destaca sua estrutura básica composta pelos elementos do desenvolvimento, pelos produtos gerados e pelos programas de curto e médio prazo.

Em Recife, o Plano Diretor de Drenagem da cidade do Recife (PDDR) de 2016 marcou uma mudança significativa no planejamento do SDU, rompendo com o modelo higienista, que priorizava o rápido afastamento da água por meio de superfícies impermeáveis e condutos artificiais (Tassinari, 2014).

Para solucionar problemas de drenagem, o PDDU adotou princípios como a bacia hidrográfica como unidade de planejamento, o uso de soluções sustentáveis, o controle do escoamento na fonte e a criação de áreas de amortecimento em vez de canalizações, conforme Alencar *et al.* (2016).

Esses princípios fazem parte do conceito de Drenagem Urbana Sustentável, que, segundo Canholi (2014), consiste em medidas de controle voltadas à redução dos impactos da urbanização, preservando as características hidrológicas o mais próximas possível das condições naturais.

Birck e Bezerra (2016) destacam que o objetivo desta concepção de projeto de drenagem é livrar-se da água pluvial, de modo que o despejo à jusante aconteça de forma controlada, incorporando medidas alternativas de controle de enchentes. Essas medidas concentram diferentes soluções como bacias de percolação, valas de infiltração, pavimentos permeáveis, microreservatórios, bacias de detenção, etc.

De acordo com Woods-Ballard *et al.* (2007 *apud* Birck; Bezerra, 2016), os fundamentos do Sistema de Drenagem Urbana Sustentável, se resumem em:

- Reduzir as vazões e taxas de escoamento;
- Reduzir os volumes adicionais consequentes da urbanização;
- Promover a recarga natural dos aquíferos;
- Reduzir a concentração de poluentes e atuar como zona de amortecimento em caso de acidentes com derramamento de contaminantes;
- Prover *habitats* para os animais e agregar valor estético para as áreas urbanas.

Em suma, a adoção de um SDU Sustentável, fundamentado em soluções integradas e inovadoras, revela-se indispensável para mitigar os impactos decorrentes da urbanização acelerada e das mudanças climáticas. Ao priorizar medidas que reduzem o escoamento superficial, promovem a recarga dos aquíferos, controlam a poluição e preservam a qualidade ambiental, torna-se possível transformar o desafio dos desastres hídricos em uma oportunidade para o desenvolvimento urbano sustentável.

Assim, a integração entre políticas públicas, planejamento urbano e tecnologias verdes desponta como caminho essencial para construir cidades mais resilientes e capazes de proporcionar melhor qualidade de vida para seus habitantes.

## 2.2 TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS EM DRENAGEM

Diante do novo cenário da drenagem urbana e da busca por uma abordagem mais sustentável, diversos países da Europa, Estados Unidos e Austrália têm utilizado soluções conhecidas como técnicas compensatórias, baseadas no conceito de drenagem sustentável (Cabral; Santos, 2022).

Segundo Silva e Cabral (2014), essas técnicas visam ajustar o ciclo hidrológico por meio da infiltração e do armazenamento do escoamento, reduzindo os picos de vazão durante eventos chuvosos e aumentando o tempo de concentração na bacia.

Bell, McMillan e Jefferson (2016) utilizam o termo *Stormwater Control Measures* (SCM's – Medidas de Controle de Águas Pluviais) para se referir às técnicas compensatórias, no entanto, acrescenta que sua capacidade de restauração dos regimes hidrológicos naturais depende tanto da extensão da medida quanto do grau de urbanização da bacia.

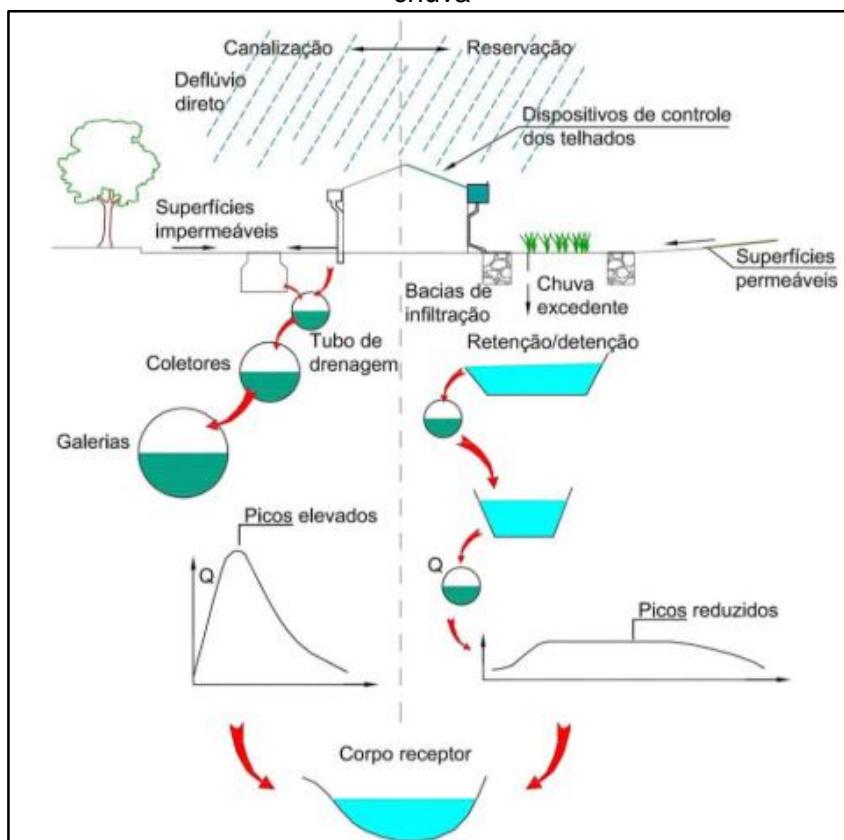
O Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais do Recife (Alencar *et al.*, 2016) classifica tais medidas como estruturais e não estruturais. As primeiras correspondem às obras implantadas para corrigir os problemas causados pelas enchentes e se caracterizam por provocarem grandes intervenções físicas nas bacias; já as segundas realizam o controle por meio de normas, regulamentos e programas, visando disciplinar quanto ao uso e ocupação do solo, implantar sistemas de alerta e sensibilizar a população quanto a preservação das unidades do sistema de drenagem (Alencar *et al.*, 2016).

Como mencionado, algumas técnicas compensatórias utilizam o armazenamento temporário da água, realizando sua liberação de forma lenta após o evento chuvoso, como é o caso das bacias de detenção, bacias de retenção, microreservatórios no lote e telhados verdes.

Baptista *et al.* (2011 *apud* Canholi, 2014) definem as bacias de detenção como estruturas construídas para armazenamento temporário das águas de chuva para evitar alagamentos em outros pontos da cidade. Esse tipo de solução também é conhecido popularmente por ‘piscinão’. Sua estrutura é dotada de um orifício de saída responsável pela descarga da água acumulada que deve ser dimensionado de modo a não causar alagamentos à jusante.

Canholi (2015 *apud* Alencar, 2016) apresenta, a partir da Figura 1, um modelo esquemático dos conceitos de canalização e reservação da água da chuva, destacando a influência dos reservatórios de retenção/ detenção e de outras técnicas compensatórias na redução dos picos de vazão.

Figura 1 – Ilustração esquemática dos conceitos de canalização e reservação da água da chuva

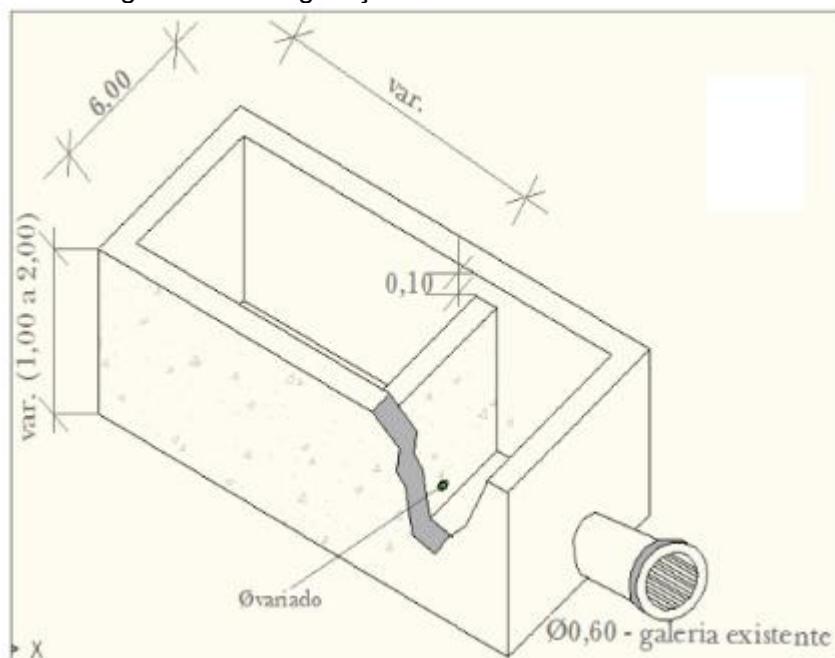


Fonte: Canholi (2015).

Como as bacias só acumulam água nos dias de chuvas intensas, passam maior parte do tempo secas e podem ser utilizadas para outros fins. Seu dimensionamento é feito considerando, para o tempo de retorno adequado, a vazão que chega ao ponto e as limitações espaciais do lugar de implantação, como área disponível e profundidade, a fim comportar o volume calculado (Cabral; Santos, 2022).

No caso da utilização de ruas, é necessário condicionar uma das dimensões do reservatório à largura dos logradouros e às cotas de fundo dos poços de visita de jusante. Na Figura 2 é ilustrado um modelo de um reservatório de detenção em ruas.

Figura 2 - Configuração dos reservatórios em ruas



Fonte: Silva; Cabral (2014).

Quanto às bacias de retenção, elas possuem os mesmos objetivos das de detenção, com a sutil diferença de liberar a água de forma mais lenta. As vazões efluentes dos dois tipos de bacias dependem do tipo e dimensões dos dispositivos de saída, que na maioria dos casos são comportas, vertedores ou uma combinação dos dois (Alencar *et al.*, 2016).

Segundo o Manual de Drenagem e Controle de Águas Pluviais de Recife (Alencar *et al.*, 2016), a implantação de microreservatórios no lote se tornou bastante viável em razão do solo local e do alto nível do lençol freático, que reduzem a eficiência de dispositivos de infiltração. Esse tipo de solução tem a vantagem de armazenar a

água no lugar em que ocorre a precipitação, reduzindo, dessa forma, o volume de água que escoa para as ruas.

A Lei Municipal de Recife Nº. 18.112 exige a criação de reservatórios no lote em terrenos com mais de 500m<sup>2</sup> que tenham mais de 25% de sua área impermeabilizada (Recife, 2015). Os reservatórios podem ser de acumulação para uso não-potável ou de retardo, onde a água é retida e depois liberada para a rede de drenagem.

Outro tipo de técnica compensatória que vem sendo amplamente difundida é o telhado verde, que consiste na utilização de uma cobertura vegetal a fim de armazenar a água da chuva, através dos processos de interceptação e evapotranspiração realizado pelas plantas, conforme Bezerra (2018). Além de reduzir o escoamento superficial e realizar o armazenamento da água para uso na edificação, os telhados verdes são ótimos isolantes acústicos e térmicos, colaborando para a redução das ilhas de calor nas grandes cidades.

Além das técnicas que têm como princípio o armazenamento temporário da água, são muito comuns técnicas compensatórias que aproveitam o potencial de infiltração do solo. Essas técnicas reduzem os volumes escoados e colaboram para a recarga do aquífero freático. Podemos citar as trincheiras de infiltração, os pavimentos permeáveis e os jardins de chuva.

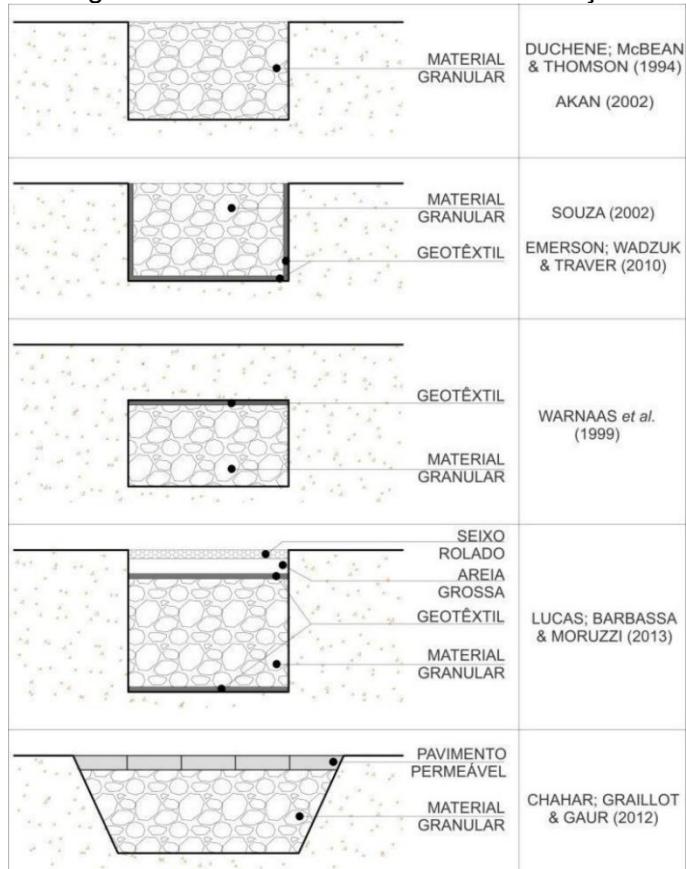
Conforme Tassinari (2014), as trincheiras de infiltração são valas escavadas preenchidas com cascalho, pedras ou outros materiais drenantes, permitindo que a água seja absorvida pelo solo natural através do fundo e das laterais. É recomendado seu uso adjacente às superfícies impermeáveis, como rodovias e ruas. Na Figura 3 são apresentados os perfis encontrados na literatura.

Os pavimentos permeáveis, por sua vez, são superfícies porosas ou perfuradas que permitem a infiltração de parte do escoamento para uma camada reserva formada por pedras de diferentes granulometrias posicionada sob o terreno (Costa Júnior e Barbassa, 2006). As superfícies podem ser de concreto poroso, asfalto poroso ou blocos intertravados (vazados ou não vazados).

Os jardins de chuva, assim como as demais medidas baseadas na drenagem sustentável, são projetados para captar, armazenar temporariamente e permitir a infiltração da água da chuva no solo. Esse processo não só reduz o escoamento, mas ajuda na melhoria da qualidade da água. Os jardins são formados por uma camada

de solo permeável e vegetação adaptada sobre depressões no terreno. Melo *et al.* (2014) caracterizaram os jardins de chuva como uma solução potencial para o desenvolvimento sustentável das cidades, atenuando os efeitos da urbanização não planejada.

Figura 3 - Perfis de trincheiras de infiltração



Fonte: Melo *et al.* (2016)

Assim, as técnicas compensatórias se mostram essenciais para minimizar os efeitos da urbanização sobre o ciclo hidrológico, contribuindo para a redução do escoamento superficial, o controle de alagamentos e a melhoria da qualidade ambiental nas cidades. Sua adoção deve ser prioridade nas políticas de planejamento urbano sustentável.

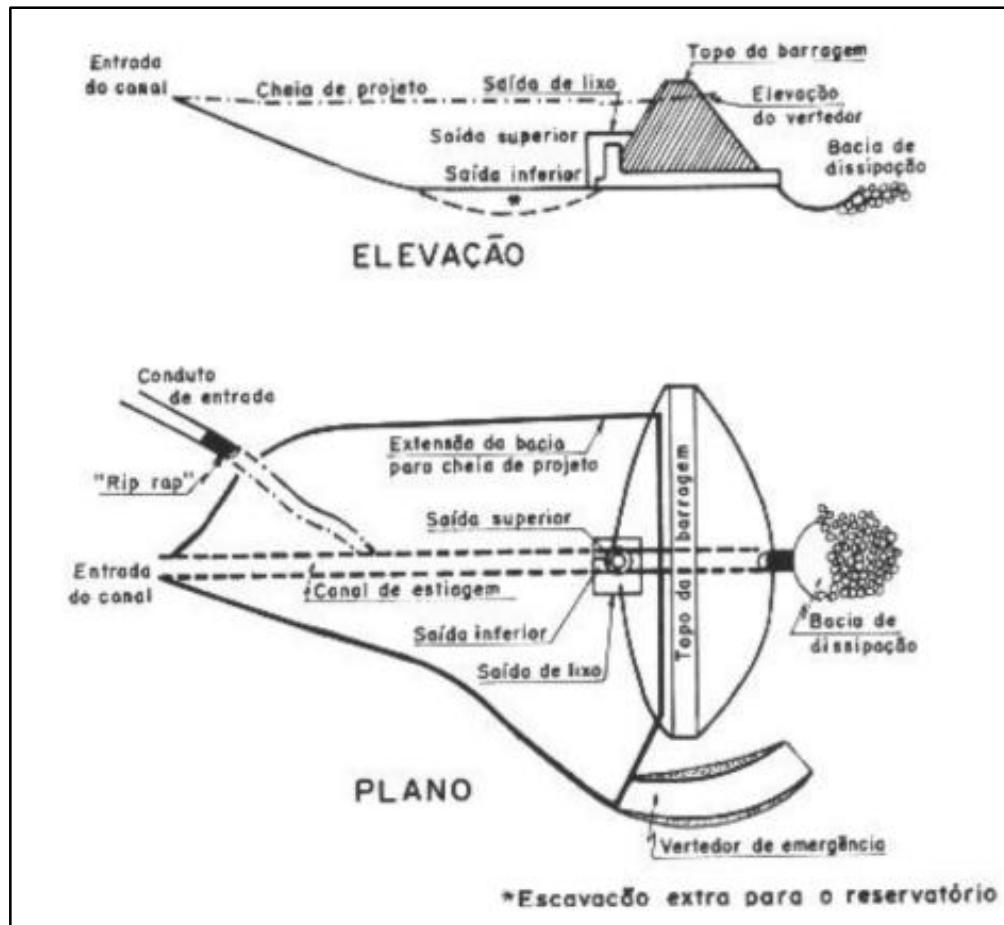
Contudo, para que elas sejam efetivamente implementadas, faz-se indispensável o suporte de ferramentas tecnológicas capazes de fornecer informações sobre o meio urbano e ambiental, como o uso e ocupação do solo, crescimento da urbanização, extensão dos corpos d'água, entre outros.

### 2.3 BACIAS DE DETENÇÃO

De acordo com Cabral e Santos (2022), algumas bacias de detenção podem ser projetadas também para favorecer a infiltração, contribuindo para a redução do volume de saída. Em outras situações, desempenham papel importante no controle da poluição difusa, uma vez que permitem que a água armazenada passe pelo processo de sedimentação e seja liberada com menos poluentes.

Entretanto, a implantação de bacias de detenção em áreas urbanas enfrenta restrições associadas às limitações geométricas, especialmente em regiões altamente adensadas. Na Figura 4, tem-se o esquema típico de uma bacia de detenção.

Figura 4 - Esquema típico de uma bacia de detenção



Fonte: Tucci (2000 *apud* Franco, 2004).

Como alternativa à falta de espaço para implantação de estruturas desse porte, tem-se recorrido à utilização dos espaços subterrâneos sob vias públicas para a construção dos reservatórios (Silva; Cabral, 2014).

Canholi (2005 *apud* Silva Júnior; Silva; Cabral, 2017) ressalta a eficiência dessas obras em comparação às soluções convencionais de drenagem, sobretudo por evitarem a transmissão das vazões a jusante — situação que inevitavelmente ocorre quando a medida se restringe apenas ao aumento das dimensões das galerias pluviais.

Nos últimos anos, diversas pesquisas foram realizadas a fim de identificar o impacto de bacias de detenção sobre a redução do escoamento superficial. Em Recife, Silva e Cabral (2014) simularam a implantação de reservatórios de detenção a nível de lote, de ruas e da bacia, a partir do modelo hidrológico *Storm Water Management Model* (SWMM).

A área para aplicação da técnica compensatória foi a bacia do canal de Sambra, na zona oeste da cidade. A simulação com reservatórios nos lotes indicou uma redução de 43%. A construção de um conjunto de reservatórios em ruas apresentou uma redução de 60% nos picos de vazão, já a implantação de um reservatório único a nível de bacia foi a solução mais eficiente, com uma redução de 80% da vazão de pico.

Em novembro de 2024, a Prefeitura do Recife inaugurou o primeiro parque alagável da capital pernambucana, localizado entre os bairros de Areias e do Ipsep. O equipamento público foi projetado para funcionar como área de lazer durante períodos secos e como bacia de detenção durante chuvas intensas. O parque com 3,9 mil m<sup>2</sup> foi construído para atenuar o histórico problema de drenagem da região. (Recife, 2024). Na Figura 5 é apresentada a área do parque alagável.

Para estimar a eficiência da implantação dessa técnica compensatória antes de sua execução, é essencial o emprego de ferramentas de modelagem hidrológica e hidráulica, capazes de simular diferentes cenários e avaliar os efeitos decorrentes de sua aplicação (Silva, 2022).

Dessa forma, recursos tecnológicos como pacotes computacionais de modelagem hidrológica, técnicas de geoprocessamento e imagens de sensoriamento remoto mostram-se indispensáveis para a elaboração de modelos e para a análise

dos impactos associados ao uso de soluções compensatórias, como as bacias de detenção.

Figura 5 - Parque alagável entre os bairros de Areias e do Ipsep (Recife/PE)



Fonte: Recife (2024).

## 2.4 SENSORIAMENTO REMOTO COMO FERRAMENTA PARA A DRENAGEM URBANA

Com o crescente avanço tecnológico e computacional, nas últimas décadas foram desenvolvidos diversos projetos de levantamento aeroespacial baseados no Sensoriamento Remoto (SR). Essa evolução tem permitido a obtenção de dados georreferenciados com alta resolução temporal e espacial, fundamentais para o monitoramento ambiental, o planejamento urbano, levantamentos geológicos, análise de bacias hidrográficas, entre outras aplicações.

Florenzanato (2002 *apud* Goulart; Matsuoka, 2021) define SR como a tecnologia que permite a obtenção de dados da superfície terrestre por meio da captação e do registro da energia refletida ou emitida por essa superfície. Já Lima *et al.* (2021) destacam que o SR possibilita a análise de grandes áreas do território de forma prática e acessível, por meio de sensores embarcados em satélites.

Essa capacidade de observar e monitorar extensas áreas com precisão tem se mostrado fundamental, por exemplo, na gestão dos recursos hídricos e na análise morfométrica de bacias hidrográficas. Bacalhau, Ribeiro Neto e Oliveira (2017), ao estudar o monitoramento da seca no sertão pernambucano, destacam a aplicabilidade do SR na detecção de alterações na cobertura do solo e na presença de água por meio de índices de vegetação. Segundo os autores, trata-se de uma solução de baixo custo diante da grande abrangência territorial proporcionada.

Por meio do SR, é possível obter parâmetros como área de drenagem, declividade, comprimento dos cursos d'água e padrão de drenagem — informações fundamentais para modelagens hidrológicas e hidrodinâmicas. No contexto da drenagem urbana, o SR tem sido utilizado para quantificar áreas impermeabilizadas, analisar mudanças no uso e ocupação do solo e identificar alterações no curso natural das águas decorrentes da urbanização (Lechiu; Oliveira Filho; Sousa, 2012).

O lançamento do satélite Landsat 8, em 2013, representou um avanço significativo na qualidade das imagens obtidas por SR, ao incorporar novas faixas espectrais no azul e no infravermelho de ondas curtas. Além disso, houve melhorias na relação sinal-ruído do sensor e na resolução radiométrica das imagens. Seu sensor, o *Operational Land Imager* (OLI), fornece imagens com resolução espacial de 30 metros, abrangendo oito bandas espectrais e com revisita a cada dezesseis dias (Sothe *et al.*, 2017).

Outro conceito fundamental no SR é o de reflectância, que consiste na razão entre a energia solar refletida pela superfície terrestre e a energia incidente sobre ela no mesmo instante. A partir da reflectância, é possível calcular diversos índices espectrais que auxiliam na identificação de corpos d'água, mudanças no uso do solo e áreas impermeabilizadas.

França, Tavares Júnior e Moreira Filho (2012) abordam, por exemplo, a aplicação do índice NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*) como ferramenta para a identificação de áreas urbanizadas. Esse índice é calculado com base na diferença entre as bandas do infravermelho médio e do infravermelho próximo, resultando em valores que variam de -1 a 1. De modo geral, valores negativos indicam áreas não construídas, enquanto valores positivos correspondem a regiões edificadas.

Além das imagens de satélite brutas, ferramentas como a plataforma MapBiomass vêm ganhando destaque ao disponibilizar séries históricas de uso e

cobertura da terra em todo o território brasileiro. Desenvolvida a partir da análise de dados de SR com o uso de algoritmos de classificação automática, a plataforma oferece dados anuais padronizados, que são essenciais para monitorar o avanço da urbanização, o desmatamento e a impermeabilização do solo, contribuindo significativamente para estudos ambientais, hidrológicos e de planejamento urbano (Mapbiomas, 2023).

Nicolete e Piroli (2024) analisaram a bacia do Rio Novo, em São Paulo, utilizando dados do MapBiomas para caracterizar o uso e a cobertura do solo em 1992 e 2022. O estudo investigou os impactos das mudanças na paisagem sobre o escoamento superficial. Os resultados indicaram que as alterações foram desfavoráveis em parte da bacia, do ponto de vista de conservação da água e do solo, uma vez que o crescimento de áreas impermeabilizadas contribuiu para o aumento do escoamento superficial.

Outro programa que vem contribuindo para obtenção de dados da superfície terrestre em Pernambuco é o Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), que é subsidiado pelo Governo do Estado de Pernambuco e surgiu a partir de mapeamentos emergenciais após as enchentes que atingiram os municípios da Mata Sul entre 2010 e 2011. Foram feitas varreduras a *laser* do terreno a fim de obter a altimetria e elaborar os projetos de barragens de controle de cheias (Pernambuco, 2025).

Com o êxito do levantamento, foi tomada a decisão de estender o mapeamento para todo o Estado. Os serviços do programa incluem recobrimento aerofotogramétrico de todo o território do Estado na escala 1:5000, perfilhamento a *laser* com precisão maior que 25cm e geração de Modelos Digitais do Terreno (MDT), Modelos Digitais de Elevação (MDE) e imagens de Intensidade Hipsométrica. Amaral, Cirilo e Ribeiro Neto (2020) utilizaram a base de dados na otimização do traçado de sistemas adutores de abastecimento de água em Pernambuco. Os autores destacaram a geração de um MDT de maior resolução, que permitiu uma maior precisão nos cálculos.

Dessa forma, a integração dos dados obtidos por SR com os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) possibilita análises espaciais mais detalhadas, promovendo diagnósticos mais precisos e subsidiando o planejamento urbano e ambiental (Siqueira, 2019 *apud* Barbosa *et al.*, 2024).

## 2.5 APLICAÇÃO DO SWWM NA MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA URBANA

A ação antrópica nas bacias urbanas, principalmente nos processos de impermeabilização do solo e alterações na macrodrenagem, tem contribuído para o aumento do volume e comportamento do escoamento superficial (Cardoso *et al.* 2014 *apud* Rocha; Pereira; Lima Neto, 2021). Devido aos elevados custos dos sistemas de drenagem, sua dinâmica de funcionamento e danos relacionados a suas falhas, é importante a antecipação desses desafios através da modelagem hidrológica.

O software *Storm Water Management Model* –SWMM (Modelo de Gestão da Drenagem Urbana), desenvolvido pela EPA (*Environment Protection Agency*), tem contribuído neste sentido ao permitir a criação de um modelo chuva-vazão através de eventos pontuais ou séries históricas (Kong *et al.*, 2017). Mas, para isso, o SWMM demanda a caracterização física e espacial acurada das sub-bacias, principalmente quanto ao uso e ocupação do solo (Niemi *et al.*, 2019).

O módulo de transporte hidráulico do SWMM simula o percurso das águas através de um sistema composto por tubulações, canais, bombas, reservatórios de armazenamento e tratamento e dispositivos de regulação. O software acompanha a variação da quantidade e qualidade do escoamento dentro de cada sub-bacia, bem como vazão, altura do escoamento e qualidade da água em cada canal ou tubulação durante o período de simulação (Cordeiro, 2019).

Segundo Tassinari (2014), o SWMM também pode ser utilizado para o dimensionamento de técnicas compensatórias. O autor cita cinco tipos genéricos de soluções: células de biorretenção, trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis, cisternas (ou barris) de chuva e valos de infiltração. Silva e Cabral (2014) utilizaram a ferramenta na análise da atenuação dos picos de vazão em área sujeita a alagamentos na zona oeste do Recife utilizando uma bacia de detenção no lote.

Cordeiro (2019) analisou, através do SWMM a utilização de um reservatório de detenção na cidade de Custódia (PE), como técnica compensatória para minimizar os problemas com alagamentos na área de estudo. Os resultados da implantação do reservatório com 3200 m<sup>3</sup> apresentaram uma redução do pico de vazão de 45,41%, em relação à rede simulada.

Desse modo, o SWMM se consolida como uma ferramenta essencial para a simulação e o planejamento de sistemas de drenagem urbana, oferecendo suporte técnico na avaliação de diferentes cenários e no dimensionamento de técnicas compensatórias. Sua aplicação permite não apenas a mitigação de alagamentos e enchentes, mas também a promoção de soluções baseadas em infraestrutura verde, alinhadas aos princípios da drenagem urbana sustentável.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta, de forma detalhada, os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento do estudo, bem como as ferramentas empregadas em sua execução.

Inicialmente, descrevem-se os critérios utilizados para a identificação das áreas vulneráveis a alagamentos no município do Recife, considerando o crescimento da área construída, os dados pluviométricos e os registros de pontos críticos de alagamento. Em seguida, são caracterizadas as condições do escoamento superficial da área de estudo a partir de dados dos dispositivos existentes na rede de drenagem urbana, levantados pela Autarquia de Limpeza e Manutenção Urbana da Cidade do Recife (EMLURB). Por fim, são definidos os parâmetros necessários à modelagem hidrológica no software *Storm Water Management Model* (SWMM), utilizando referências do Manual do Usuário SWMM Brasil (Rossman, 2012) e a equação IDF de Recife elaborada para o Plano Diretor de Drenagem da Cidade do Recife - PDDR (Alencar *et al.*, 2016).

#### 3.1 IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS VULNERÁVEIS EM RECIFE

O município do Recife possui uma área territorial de 218,843 km<sup>2</sup> e uma população de 1.488.920 habitantes (IBGE, 2022). Para identificar as áreas vulneráveis a alagamentos, foram considerados alguns parâmetros de avaliação, como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros para avaliação de áreas vulneráveis a alagamentos (Recife/PE)

Parâmetro avaliado	Forma de avaliação
Quantidade de área construída <sup>1</sup>	NDBI (Processamento de imagens de satélite pelo software QGIS) e análise de cobertura do solo pelo MapBiomas
Níveis Pluviométricos <sup>2</sup>	Banco de dados do CEMADEN
Pontos críticos de alagamento <sup>3</sup>	Dados da Defesa Civil Municipal

Fonte: Autor (2025). Fonte dos dados: <sup>1</sup>USGS (2025); Mapbiomas (2023);

<sup>2</sup>CEMADEN (2024); <sup>3</sup>Recife (2024).

Entre os parâmetros de avaliação, destacam-se o aumento da área construída, os dados pluviométricos coletados em postos distribuídos por todo o município e os

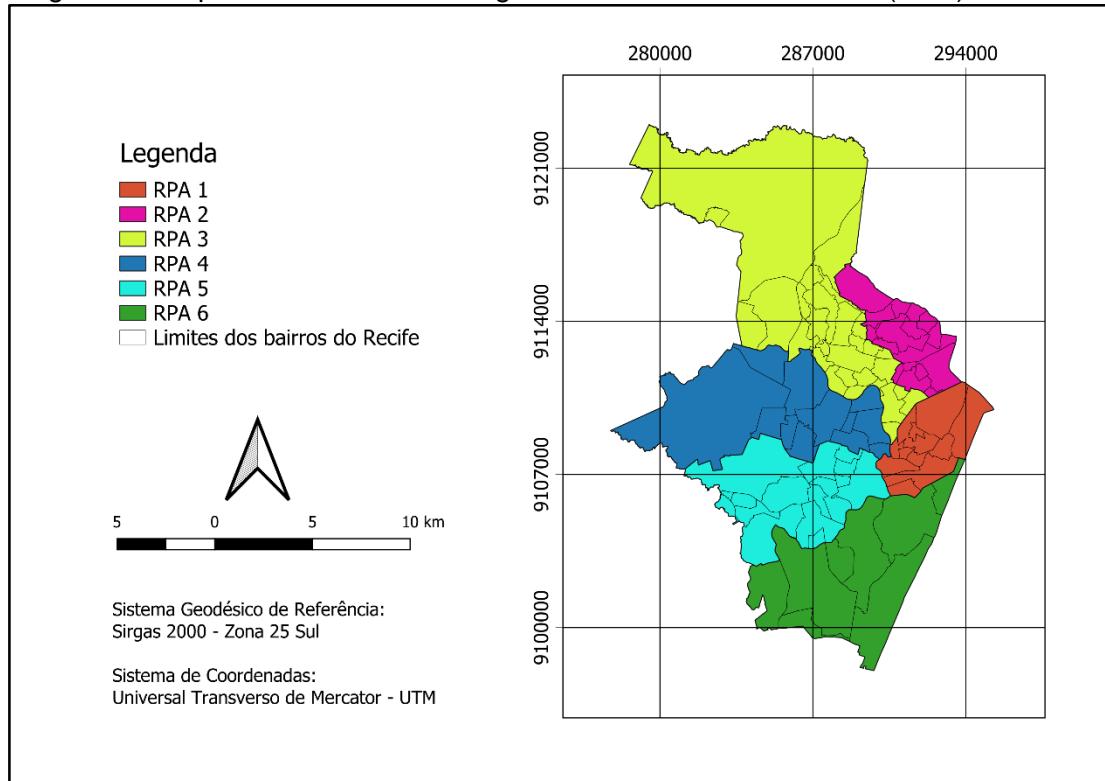
pontos críticos de alagamento levantados pela Defesa Civil Municipal. Além disso, a cidade foi analisada segundo sua divisão em Regiões Político-Administrativas (RPA), que agrupam bairros com características semelhantes (Tabela 3 e Figura 6).

Tabela 3 - Lista dos bairros por Região Político-Administrativa

RPA	Bairros Inseridos
RPA 1	Soledade, Ilha do Leite, Santo Amaro, Boa Vista, Cabanga, Paissandu, Ilha Joana Bezerra, Santo Antônio, Recife, São José e Coelhos.
RPA 2	Fundão, Rosarinho, Campina do Barreto, Porto da Madeira, Cajueiro, Beberibe, Bomba do Hemetério, Dois Unidos, Linha do Tiro, Torreão, Peixinhos, Arruda, Ponto de Parada, Encruzilhada, Alto Santa Terezinha, Campo Grande, Água Fria e Hipódromo.
RPA 3	Passarinho, Dois Irmãos, Jaqueira, Santana, Sítio dos Pintos, Pau Ferro, Derby, Mangabeira, Tamarineira, Poço, Casa Forte, Parnamirim, Brejo Da Guabiraba, Alto José Bonifácio, Alto do Mandu, Morro da Conceição, Casa Amarela, Espinheiro, Aflitos, Vasco da Gama, Alto José do Pinho, Macaxeira, Brejo do Beberibe, Nova Descoberta, Monteiro, Graças, Apipucos, Brejo da Guabiraba e Córrego do Jenipapo.
RPA 4	Cidade Universitária, Engenho do Meio, Várzea, Torrões, Iputinga, Zumbi, Cordeiro, Caxangá, Prado, Ilha do Retiro, Torre e Madalena.
RPA 5	Cacote, Curado, San Martin, Jardim São Paulo, Areais, Sancho, Barro, Estância, Tejipió, Coqueiral, Totó, Mangueira, Bongi, Mustardinha, Jiquiá e Afogados.
RPA 6	Cohab, Ipsep, Jordão, Pina, Ibura, Brasília Teimosa, Boa Viagem e Imbiribeira.

Fonte: Autor (2025).

Figura 6 - Mapa com divisão das Regiões Político-Administrativas (RPA) do Recife



Fonte: Autor (2025).

### 3.1.1 Processamento das regiões com maior crescimento de área construída

Para identificar as regiões do Recife que tiveram um maior crescimento das áreas impermeáveis, foram utilizados dois recursos: análise dos índices NDBI e comparação com os dados de uso e cobertura do solo da plataforma MapBiomass.

Um fator limitante na análise de imagens de satélite é a presença de nuvens, pois interfere diretamente na fidelidade dos resultados. A fim de dirimir esse fator, foram selecionadas imagens do satélite estadunidense *Land Remote Sensing Satellite* (Landsat8), sensor *Operational Land Imager* (OLI), utilizando um filtro para obter a menor cobertura de nuvens possível.

A partir das imagens obtidas gratuitamente na plataforma *Earth Explorer*, do *United States Geological Survey* (USGS, 2025), foram selecionadas as cenas correspondentes aos dias 28 de julho de 2013 e 26 de julho de 2024 (Tabela 3), com o objetivo de realizar uma análise mais consistente do crescimento urbano. A escolha de imagens de períodos equivalentes favorece a qualidade da comparação, pois minimiza a influência de fatores sazonais, como variações de precipitação, umidade do solo e cobertura de nuvens.

Tabela 4 - Data das imagens, hora, ângulo de elevação do sol e ponto do satélite

Data	Hora (UTM)	Ângulo de elevação do sol	Órbita	Ponto
28/07/2013	12:31:03	51,2414	214	65
26/07/2024	12:28:41	50,5241	214	65

Fonte: Autor (2025).

Após a inserção e empilhamento das bandas no Software QGIS, as imagens foram reprojetadas para o sistema de referência SIRGAS 2000/UTM ZONE 25S, que tem como código EPSG 31985. Para o cálculo das reflectâncias foi utilizada a Equação 1 aplicada na Calculadora Raster do Software, tendo como dados de entrada o fator de escala multiplicativo  $M_p$ , o fator aditivo  $A_p$ . Esses fatores representam a correção de escala das imagens considerando a reflectância na superfície (SR), do tipo BOA - Bottom of Atmosphere (Base da Atmosfera), conforme as orientações dispostas no *Landsat 8 Users Handbook* - Manual do Usuário de Dados do Landsat 8 (USGS, 2019) e Ruhoff, Silva e Rocha (2015).

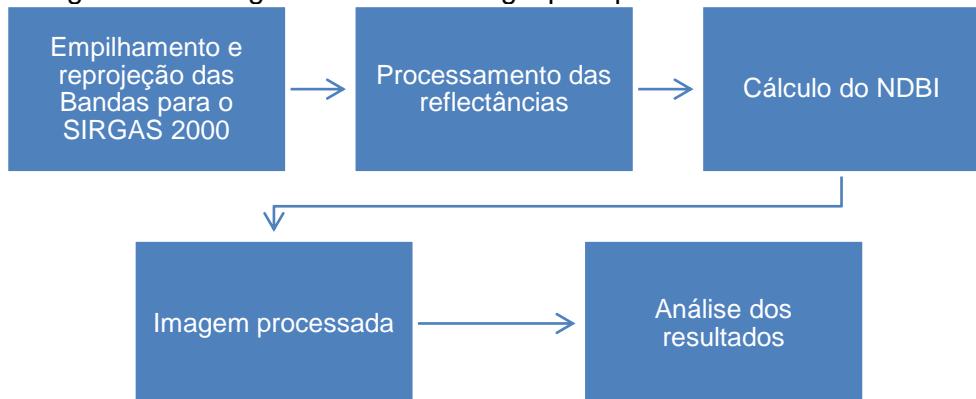
$$\rho\lambda i = Mpi \times NDi + Ap_i \quad (1)$$

Em seguida, foi realizado o processamento do Índice de Construção por Diferença Normalizada (NDBI) para os anos 2013 e 2024, a fim de identificar os bairros que sofreram um processo mais intenso de urbanização no período, utilizando as reflectâncias referente às bandas do infravermelho próximo e médio (bandas 5 e 6). O índice foi calculado a partir da Equação 2, desenvolvida por França, Tavares Júnior e Moreira Filho (2012) para identificar áreas urbanas e edificadas.

$$\text{NDBI} = \frac{\text{PIVM} - \text{PIVP}}{\text{PIVM} + \text{PIVP}} \quad (2)$$

Após o processamento do índice nas duas imagens, foi feita a comparação entre as áreas que apresentaram uma maior presença de pixels com valores positivos, indicando um aumento na quantidade de área construída. Silva, Costa Júnior e Lima (2014) defendem que esta técnica de análise apresenta uma precisão de 92%. A Figura 4 apresenta o fluxograma do processamento.

Figura 7 - Fluxograma da metodologia para processamento do índice NDBI



Fonte: Autor (2025).

A fim de validar o processamento das imagens do NDBI, foi utilizada a plataforma Mapbiomas (2023) para extrair os *rasters* com a classificação do uso e cobertura do solo para Recife nos anos de 2013 e 2023. O projeto, que já está na Coleção 9, disponibiliza os mapas em sua plataforma *online* e também permite o download dos arquivos *GeoTiff* para todos os anos de 1985 a 2023, ano da última atualização. Por esse fato, foi utilizado o mapa do ano de 2023 e não de 2024, como no cálculo do NDBI. Os mapas obtidos serão usados para identificar o crescimento das áreas urbanizadas em cada RPA do Recife.

Os *rasters* do MapBiomas são separados por classes de acordo com o tipo de uso e ocupação do solo e são fornecidas legendas para facilitar a identificação de cada classe. O relatório das áreas construídas foi obtido através do plugin “r.report” do QGIS, que tem como dados de entrada a camada *raster* a ser relatada e a unidade de área pretendida. Os resultados são fornecidos através de um arquivo *.txt* com os valores de área de cada classe presente no mapa.

Os mapas do MapBiomas (2023) foram escolhidos para levantamento das áreas construídas por apresentar uma melhor precisão em termos numéricos em comparação com o NDBI.

### **3.1.2 Coleta dos dados pluviométricos**

Para uma avaliação coerente com o período de análise das imagens de satélite, fez-se necessário uma avaliação da situação atual da pluviometria na cidade, utilizando para tal fim os dados dos postos pluviométricos situados na área do município.

Optou-se por utilizar os dados pluviométricos referentes ao ano de 2024, disponíveis na plataforma do Mapa Interativo do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN, 2025), uma vez que correspondem ao período mais recente com registros completos e coincidem com a data da imagem mais atual empregada na análise da área construída.

Na Tabela 5 são apresentados os dados dos postos pluviométricos utilizados no estudo, enquanto na Figura 8 exibe-se suas localizações georreferenciadas, obtidas pelas coordenadas fornecidas nas planilhas de dados pluviométricos do CEMADEN.

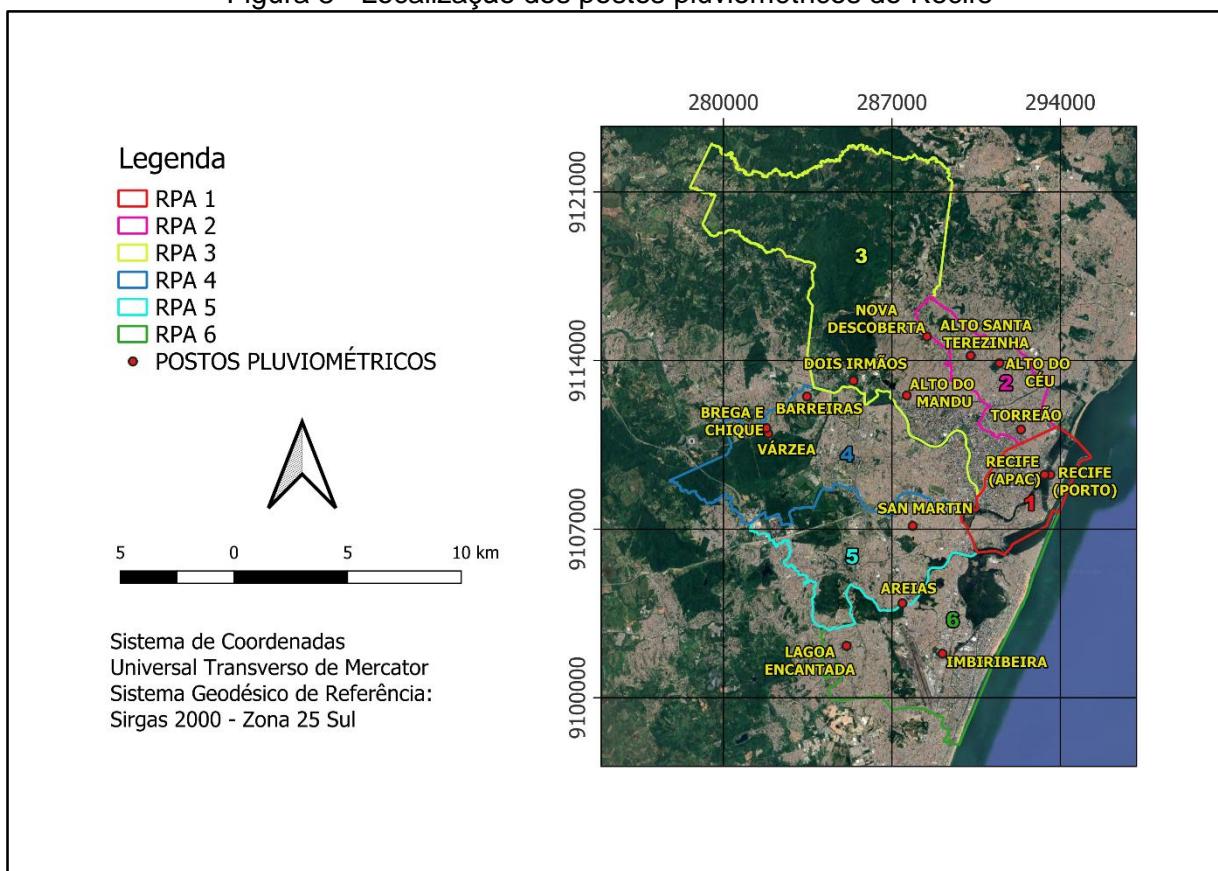
Os relatórios mensais fornecem dados aferidos de hora em hora para cada posto, por isso, fez-se necessário realizar o somatório dos dados horários a fim de obter a altura diária de chuva precipitada. Em seguida, foram identificados os dias de maior precipitação em cada mês, o posto correspondente e as precipitações dos demais postos no mesmo dia de referência. Após a sistematização dos dados, as precipitações diárias dos quinze postos pluviométricos foram organizadas para cada mês, conforme o Apêndice A.

Tabela 5 - Dados dos postos pluviométricos utilizados no estudo

Posto	Nome	Código
P1	Porto	261160620A
P2	Recife - Apac	261160623A
P3	Alto do Céu	261160607A
P4	COMPАЗ - Alto Santa Teresinha	261160616G
P5	Torreão	261160618A
P6	Alto do Mandu	261160610A
P7	Dois Irmãos	261160603A
P8	Nova Descoberta	261160605A
P9	Barreira	261160604G
P10	Brega e Chique	261160603G
P11	Várzea	261160601A
P12	Areias	261160621A
P13	San Martin	261160619A
P14	Imbiribeira	261160609A
P15	Lagoa Encantada - COHAB	261160606G

Fonte: Autor (2025). Fonte dos dados: CEMADEN (2025).

Figura 8 - Localização dos postos pluviométricos do Recife



Fonte: Adaptado do Google Earth (2025). Fonte dos dados: CEMADEN (2025).

### 3.1.3 Identificação dos pontos críticos de escoamento de águas pluviais

Nesta etapa, foram utilizados dados relativos aos atendimentos realizados pela Defesa Civil Municipal no ano de 2024 em pontos de alagamento espalhados por toda a cidade, obtidos no Portal de Dados Abertos da Cidade do Recife (Recife, 2025). O órgão fornece relatórios anuais dos atendimentos realizados para as mais diversas ocorrências como desabamento de encostas, alagamento de ruas e setores e imóveis em risco.

Os dados foram filtrados para identificar exclusivamente as ocorrências de alagamento, sendo posteriormente quantificados por bairro e, em seguida, por Região Político-Administrativa (RPA). Durante esse processo, foram desconsiderados o número de repetições dos pontos, uma vez que os atendimentos costumam ocorrer mais de uma vez ao longo do ano, especialmente nos meses com maior índice pluviométrico; resultando apenas no número de pontos diferentes de alagamento em cada RPA.

## 3.2 REDE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Segundo Lafayette *et al.* (2018), a rede de microdrenagem do Recife é formada por galerias que coletam as águas das chuvas pelas caixas coletoras, pelas bocas de lobo do tipo grelha ou gaveta que deságua em poços de visita da rede de conduto enterrado com uma extensão de 1.057,28 km, além dos 398,03 km de canaletas superficiais. O PDDR é de 2016, ano da última atualização, apresentou a relação dos elementos de drenagem cadastrados no âmbito da cidade do Recife. A Tabela 6 contém a relação desses elementos para cada RPA.

Tabela 6 – Relação dos elementos de drenagem do Recife por RPA

Dispositivo	RPA 1	RPA 2	RPA 3	RPA 4	RPA 5	RPA 6
<b>Condutos (m)</b>	128.058	125.444	114.899	248.036	172.379	268.463
<b>Canaletas (m)</b>	10.244	103.454	158.353	21.170	29.560	75.251
<b>Poço de visita (un)</b>	3.422	2.310	2.740	2.887	2.097	2.740
<b>Boca de lobo (un)</b>	2.251	2.165	2.114	3.488	2.716	2.591
<b>Caixa de gaveta (un)</b>	4.224	4.953	3.949	10.673	7.547	12.564

Fonte: Recife (2016).

### 3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O *STORM WATER MANAGEMENT MODEL* (SWMM)

Para realização da modelagem hidrológica pelo *Storm Water Management Model* SWMM, o software exige a definição de algumas propriedades do projeto para poder realizar a simulação, como subáreas, condutos e nós. Essa definição dos parâmetros de entrada do modelo envolveu diferentes procedimentos.

Após a identificação do bairro crítico de estudo, é necessário delimitar a microbacia a ser considerada dentro da área. Para isso, fez necessário analisar as direções de drenagem e as microbacias de interesse geradas no QGIS através do comando “*r.water.outlet*”.

Nesse processo é fundamental o recorte do Modelo Digital do Terreno (MDT), para identificar a altimetria da área. O recorte do MDT foi obtido através da plataforma PE3D (Pernambuco, 2025), com o *download* das imagens no formato *raster*. Na Tabela 7 são apresentados os códigos das cartas do MDT onde o município do Recife está inserido.

Tabela 7 - Cartas do Modelo Digital do Terreno (MDT) na região de Recife

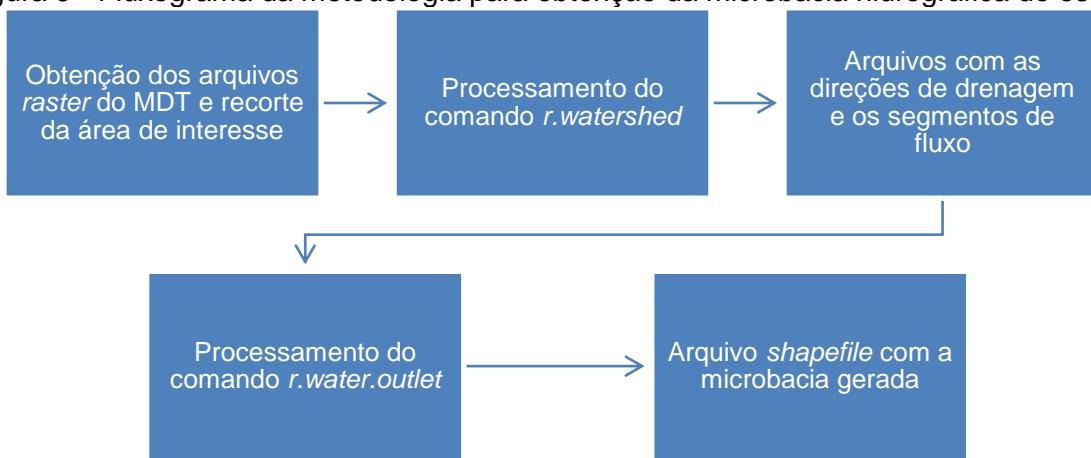
Código
MDT-SC-25-V-A-III-1-NO-D-III
MDT-SC-25-V-A-III-1-NO-D-IV
MDT-SC-25-V-A-III-1-NO-F-I
MDT-SC-25-V-A-III-1-NO-F-II

Fonte: Autor (2025). Fonte dos dados: Pernambuco (2025).

O comando “*r.watershed*”, por sua vez, tem como entrada o *raster* com o MDT e como arquivos de saída as direções de drenagem e os segmentos de fluxo. O *raster* com os segmentos de fluxo e as coordenadas do exutório onde se pretende determinar a bacia de contribuição são usados pelo comando “*r.water.outlet*” para gerar o *shapefile* com a área da microbacia. Na Figura 9 é apresentado o fluxograma do processamento.

A área de contribuição foi delimitada no QGIS a partir da vetorização das quadras, enquanto a largura do escoamento superficial foi estimada pela razão entre a área da quadra e o comprimento médio na direção principal do fluxo.

Figura 9 - Fluxograma da metodologia para obtenção da microbacia hidrográfica de estudo



Fonte: Autor (2025).

A declividade foi obtida do Modelo Digital do Terreno (MDT), com o uso do comando “estatísticas zonais” no QGIS. O comando utiliza o *shapefile* das quadras e o *raster* do MDT para fornecer estatísticas sobre cada polígono, como contagem, soma e média. Nesse caso, a declividade média das quadras.

A taxa de impermeabilização definida segundo a classificação do uso e cobertura do solo, foi obtida a partir dos mapas do Mapbiomas. Já a profundidade das depressões, que representa a retenção inicial da água na superfície, seguiu os valores de referência sugeridos pelo *Storm Water Management Model* (SWMM) conforme o tipo de cobertura. Na Tabela 8 são apresentados os valores de referência. Para ordem prática de dimensionamento, adotou-se 2,54 mm para superfícies impermeáveis e 5,0 mm para as superfícies permeáveis.

Tabela 8 - Valores típicos de armazenamento em depressões

Natureza da superfície	Valores (mm)
Superfícies impenetráveis	1,27 – 2,54
Gramado	2,54 – 5,08
Pastagem	5,08
Serrapilheira	7,62

Fonte: ASCE (1992 *apud* Rossman, 2012).

A rugosidade, expressa pelo coeficiente n de Manning, foi estimada a partir das características do recobrimento do solo, utilizando valores de referência do *Storm Water Management Model* (SWMM), sendo adotado 0,013 para áreas impermeáveis e 0,13 para superfícies permeáveis sem cobertura natural (Tabela 9). As cotas dos

nós foram obtidas no QGIS a partir do MDT, representando as altitudes dos pontos de descarga dos lotes. A profundidade máxima dos condutos foi definida em função do diâmetro adotado, correspondente a 1000 mm, enquanto o comprimento dos condutos correspondeu à distância entre os nós de montante e jusante de cada trecho, medidos diretamente no QGIS, a partir da tabela de atributos.

Tabela 9 – Coeficiente (n) de Manning – escoamento 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	0,050
Solos cultivados	
Cobertos de resíduos < 20%	0,060
Cobertos de resíduos > 20%	0,170
Campo natural	0,130
Grama	
Curta, pradaria	0,150
Densa	0,240
Grama-bermudas	0,410
Floresta	
Vegetação leve	0,400
Vegetação rasteira densa	0,800

Fonte: McCuen (1996 *apud* Rossman, 2012).

O SWMM dispõe de três modelos diferentes para determinação da variável de infiltração: Modelo de Horton, Green-Ampt e Curva-Número do SCS. Adotou-se, para este estudo, o modelo da Curva-Número do *Soil Conservation Service* dos Estados Unidos. A determinação do escoamento superficial através do modelo adotado, exige obter através da Tabela 10 o valor do número da curva para diferentes tipos de superfície e tipos de solo.

O valor de CN adotado para todas as sub-áreas foi de 98, considerando as características da ocupação da bacia.

Tabela 10 - Valores de CN para bacias com ocupação urbana.

<b>Utilização ou cobertura do solo</b>	<b>Tipos de solo</b>			
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Zonas cultivadas sem conservação do solo	72	81	88	91
com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições	68	79	86	89
Baldios – boas condições	61	61	74	80
Prado em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas cobertura ruim	45	66	77	83
Florestais cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, boas condições				
Com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
Com relva de 50 a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios	89	92	94	95
Zonas industriais	81	88	91	93
Zonas residenciais				
Lotes de (m <sup>2</sup> )				
<500	77	85	90	92
1000	61	75	83	87
1300	57	72	81	86
2000	54	70	80	85
4000	51	68	79	84
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.	98	98	98	98
Arruamentos e estradas asfaltadas com drenagem				
De águas pluviais	98	98	98	98
Paralelepípedos	76	85	89	91
Terra	72	82	87	89

Fonte: McCuen (1996 *apud* Rossman, 2012).

Para estabelecer, no modelo, uma determinada chuva, como dado de entrada é necessário especificar as propriedades do pluviômetro. O formato da precipitação pode ser dado em intensidade, volume ou volume acumulado. Foi adotado o formato dos dados de chuva em intensidade.

Os dados da chuva são vinculados ao pluviômetro através de uma série temporal que, para este estudo, foi calculada a partir da equação IDF (Equação 3), elaborada pela EMLURB para Recife no contexto da elaboração do PDDR, conforme Silva Júnior (2015).

$$i = \frac{611,3425 \times Tr^{0,1671}}{(t + 7,3069)^{0,6348}} \quad (3)$$

Onde,  $i$  é a intensidade de chuva, em mm/h;  $T_r$  é o tempo de retorno, em anos; e  $t$  é a duração da chuva, em minutos.

Adotou-se um tempo de retorno de 5 anos (usual para obras de microdrenagem) e um tempo de duração de chuva de 1h com intervalos de 10 minutos, conforme Cordeiro (2019) e Silva Júnior (2015). Na Tabela 11 tem-se as intensidades de chuva em cada intervalo.

Tabela 11 - Intensidade da precipitação na área de estudo

Duração (min)	$i$ (mm/h)
10	130,94
20	98,02
30	80,41
40	69,16
50	61,23
60	55,29

Fonte: Autor (2025).

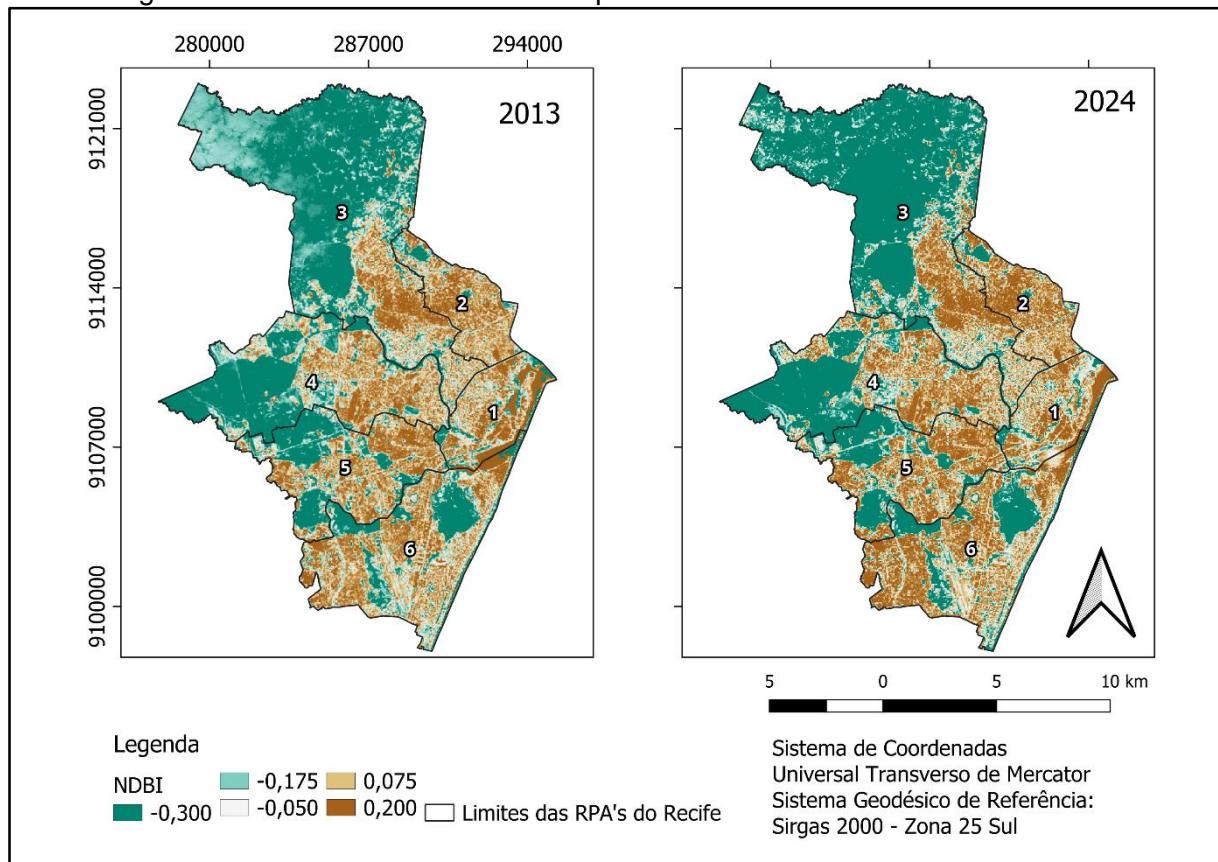
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO PARA A MODELAGEM HIDROLÓGICA

#### 4.1.1 Identificação da RPA crítica para o estudo

A Figura 10 apresenta os mapas do índice NDBI dos anos de 2013 e 2024 para a cidade do Recife, com a delimitação das Regiões Político-Administrativas (RPAs). É possível observar o crescimento ou adensamento das áreas construídas pela maior presença de pixels em tons de marrom (entre 0,075 e 0,200) na imagem de 2024, correspondentes a valores positivos do NDBI, de acordo com Leonardo *et al.*(2025).

Figura 10 - Processamento do NDBI para os anos de 2013 e 2024 no Recife

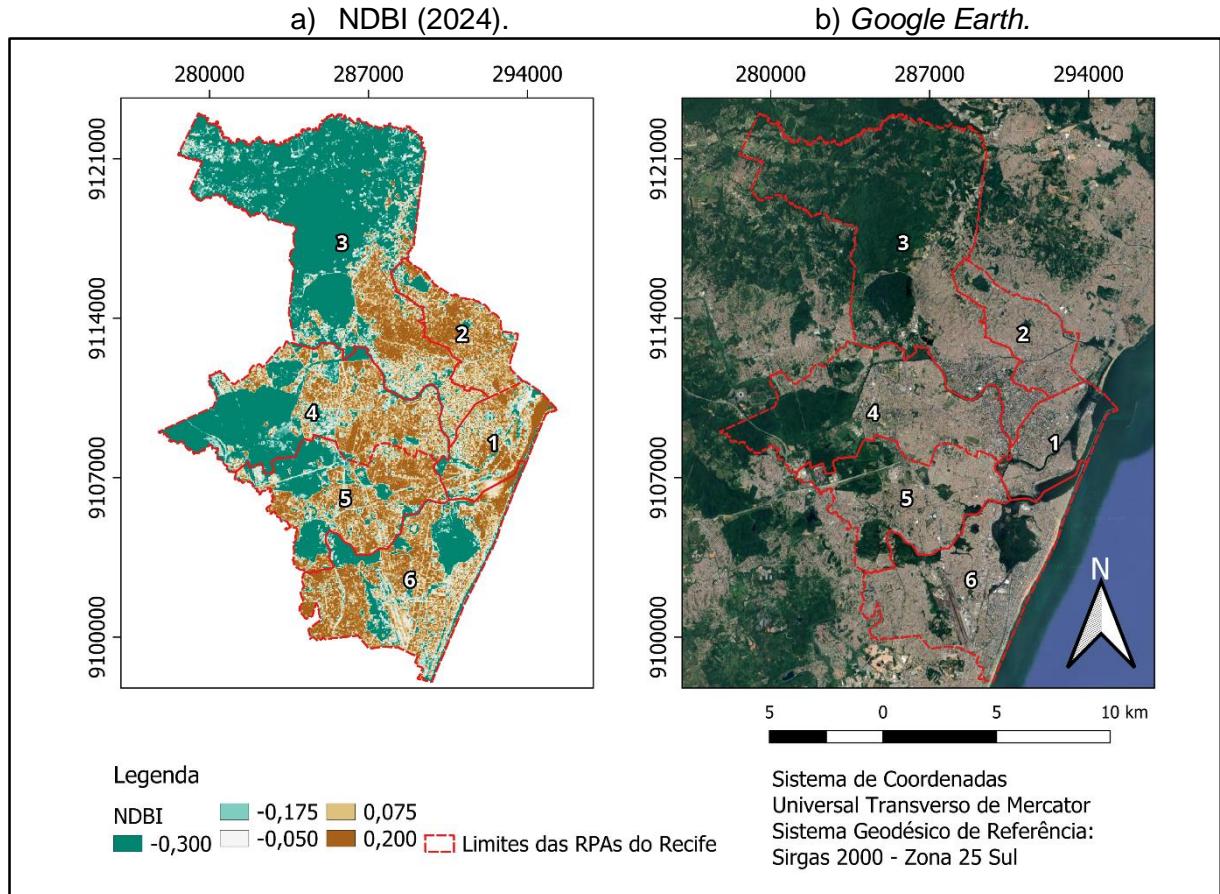


Fonte: Autor (2025).

Para validar a eficácia do NDBI na identificação de áreas construídas, na Figura 11 é apresentada uma comparação entre o mapa do índice NDBI de 2024 e uma imagem do *Google Earth* de 2025. Observa-se que as áreas com valores mais altos

de NDBI (entre 0,075 e 0,200) coincidem com regiões densamente edificadas na imagem do Google Earth, enquanto as áreas com valores negativos do índice (entre -0,050 e -0,300) correspondem predominantemente a vegetação ou mata preservada, o que confirma a mesma metodologia utilizada por Salgueiro (2021) para comparar mapas do NDBI com imagens de satélite do Recife.

Figura 11 - Comparação entre o NDBI de 2024 e Imagem de Satélite (*Google Earth*) de 2025 no Recife



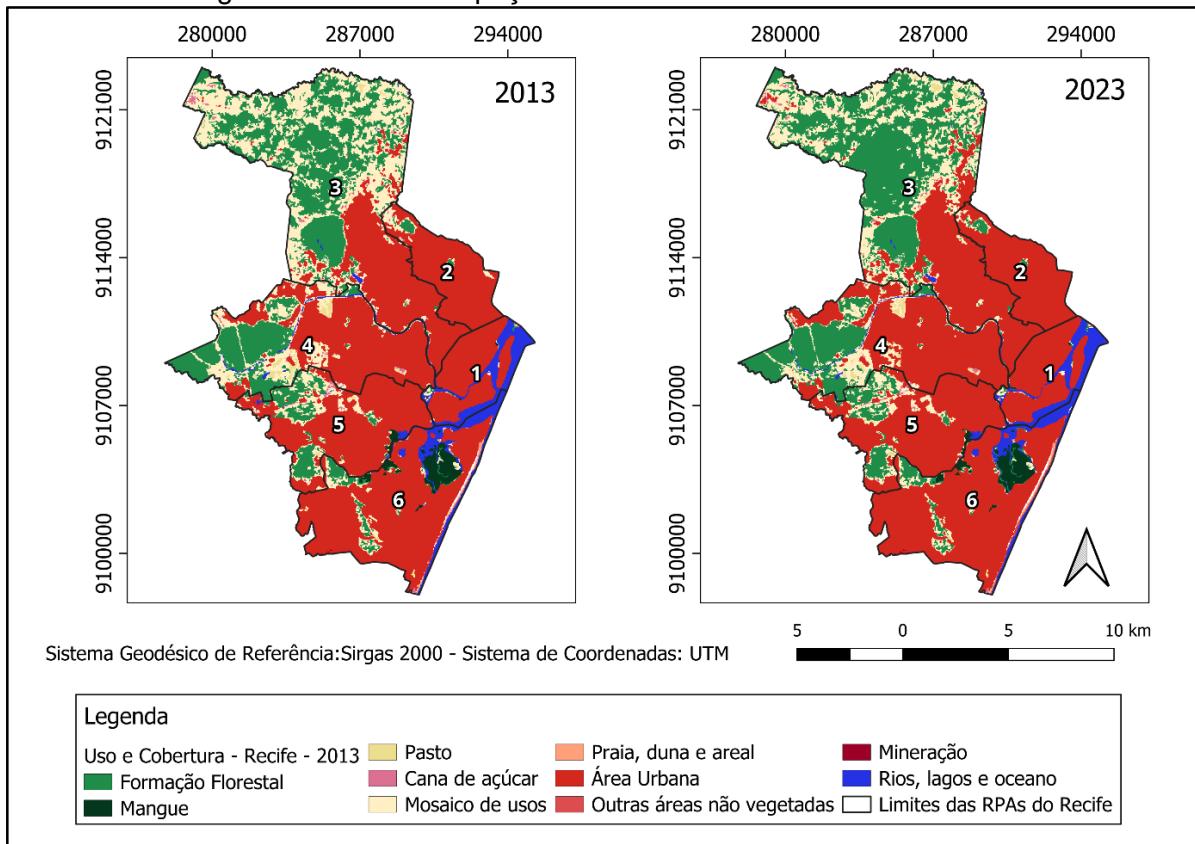
Fonte: (a) Autor (2025); (b) *Google Earth*, imagem de satélite (2025).

Após a análise visual e numérica dos mapas do NDBI, foram examinados os mapas de uso e ocupação do solo da cidade do Recife, referentes aos anos de 2013 e 2023, conforme apresentado na Figura 12.

Os resultados do NDBI apresentaram crescimento em todas as RPAs no intervalo de 2013 a 2024, contudo, a área construída total foi inferior aos dados existentes da área urbanizada de Recife (IBGE, 2022). Desse modo, o NDBI foi utilizado apenas para inspeção visual do crescimento urbano e confirmação das RPAs mais críticas quanto à impermeabilização do solo. Os valores de área construída

foram obtidos dos mapas do uso e ocupação do solo do MapBiomass, por se apresentarem mais coerentes com a área total do município.

Figura 12 - Uso e ocupação do solo em Recife em 2013 e 2023



Fonte: Autor (2025), adaptado de MapBiomass (2023).

Na Tabela 12 tem-se os resultados de área construída para cada Região Político-Administrativa do Recife em 2013 e 2023, bem como o crescimento absoluto no período de análise.

Tabela 12 - Crescimento da área construída (em Km<sup>2</sup>) por Região Político-Administrativa (RPA) do Recife entre 2013 e 2023

	Área em 2013 (Km <sup>2</sup> )	Área em 2023 (Km <sup>2</sup> )	Crescimento absoluto (Km <sup>2</sup> )	% do crescimento urbano total da cidade 2013-2023
<b>RPA 1</b>	10,67	10,86	0,19	3,46%
<b>RPA 2</b>	13,51	13,99	0,48	8,87%
<b>RPA 3</b>	20,20	22,36	2,16	40,13%
<b>RPA 4</b>	21,81	23,23	1,41	26,30%
<b>RPA 5</b>	20,78	21,48	0,71	13,16%
<b>RPA 6</b>	29,80	30,23	0,43	8,09%

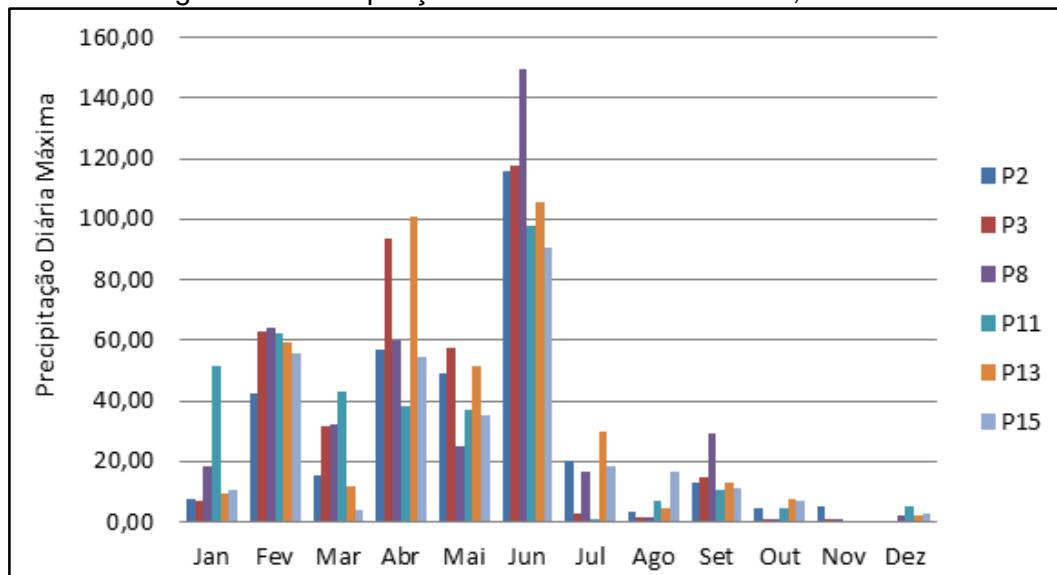
Fonte: Autor (2025).

As RPA's 3, 4 e 5 concentraram os maiores percentuais do crescimento urbano do Recife entre 2013 e 2023, respondendo por 40,13%, 26,30% e 13,16% do total acrescido no período, respectivamente. Esses dados evidenciam que grande parte da expansão da área construída ocorreu nessas regiões, refletindo um aumento mais expressivo da impermeabilização do solo local.

Esse processo ganha ainda mais relevância quando analisado em conjunto com os dados pluviométricos do município, pois a combinação entre adensamento urbano e a intensidade das chuvas pode agravar significativamente os problemas relacionados ao escoamento superficial e aos alagamentos urbanos.

A partir dos dados de precipitação registrados no município do Recife no ano de 2024, na Figura 13 é apresentada a variação da precipitação diária máxima ao longo dos meses, destacando os postos pluviométricos que registraram os maiores volumes. Observa-se uma concentração significativa de eventos extremos entre os meses de fevereiro e junho, com destaque para o posto P8, localizado na RPA 3, em junho, que ultrapassou os 140 mm em um único dia.

Figura 13 - Precipitação diária máxima em Recife, em 2024



P2 = Recife – Apac (RPA 1) | P3 = Alto do Céu (RPA 2) | P8 = Nova Descoberta (RPA 3)

P11 = Várzea (RPA 4) | P13 = San Martin (RPA 5) | P15 = Lagoa Encantada (RPA 6)

Fonte: Autor (2025).

O comportamento da Figura 13 reflete o padrão sazonal típico da região, caracterizado por chuvas intensas no outono e início do inverno. Já nos demais

meses, especialmente entre julho e dezembro, os volumes máximos diários caem consideravelmente, com registros inferiores a 40 mm.

Complementando a análise da precipitação diária máxima apresentada na Figura 13, na Tabela 13 resume-se a distribuição espacial dos eventos de maior volume de chuva diária registrados ao longo do ano de 2024, organizados por Região Político-Administrativa (RPA). Vale destacar que, em alguns casos, múltiplos eventos ocorreram em um mesmo posto pluviométrico, de modo que os valores da tabela não representam a quantidade de postos distintos, mas sim a frequência com que as RPAs concentraram os maiores volumes diários de precipitação.

Tabela 13 - Número de eventos de precipitação diária máxima por Região Político-Administrativa (RPA) do Recife em 2024

RPA	Nº de eventos de chuva máxima	Nome do posto	Data do evento	Volume precipitado (mm)
1	1	(P2) Recife - Apac	06/11/2024	5,12
2	1	(P3) Alto do Céu	28/05/2024	57,57
		(P7) Dois Irmãos	03/12/2024	23,60
			16/02/2024	64,24
<u>3</u>	<u>4</u>	(P8) Nova Descoberta	15/06/2024	149,82
			08/09/2024	29,49
			11/01/2024	51,71
<u>4</u>	<u>2</u>	(P11) Várzea	14/03/2024	42,92
			04/04/2024	100,96
<u>5</u>	<u>3</u>	(P13) San Martin	06/07/2024	30,00
			29/10/2024	7,90
6	1	(P15) Lagoa Encantada	04/08/2024	16,60

Fonte: Autor (2025).

Observa-se que a RPA 3 concentrou o maior número de eventos com registros máximos de precipitação diária (quatro ocorrências), seguida pela RPA 5, com três. Essas regiões, portanto, se destacam como áreas mais críticas do município, tanto pela frequência quanto pela intensidade dos episódios de chuva extrema. A RPA 4 também apresentou dois eventos com registros máximos, enquanto as demais (RPAs 1, 2 e 6) registraram apenas um evento cada.

O Posto 8, localizado no bairro de Nova Descoberta (RPA 3), apresentou máximas nos meses de fevereiro, junho e setembro, sendo a do mês de junho a mais significativa de todo o município em 2024, com um volume diário de 149,82 mm. Já o

Posto 13, situado em San Martin (RPA 5), registrou máximas diárias em abril, julho e outubro, com destaque para o mês de abril, quando foram contabilizados 100,96 mm.

Esses resultados reforçam a importância de priorizar as RPAs 3 e 5 nas ações de planejamento e gestão da drenagem urbana. A recorrência de eventos extremos nessas regiões evidencia a necessidade de intervenções estruturais e estratégias sustentáveis de controle do escoamento superficial, visando a redução dos riscos associados a alagamentos e uma maior resiliência urbana frente à variabilidade climática.

A fim de complementar a análise dos registros de precipitação diária máxima, na Tabela 14 tem-se o número de pontos distintos de alagamento identificados por Região Político-Administrativa (RPA) no ano de 2024. Diferente das ocorrências, esse levantamento considera apenas os locais únicos onde o alagamento foi registrado, independentemente da frequência com que o evento se repetiu ao longo do ano.

Tabela 14 - Número de pontos distintos de alagamento por Região Político-Administrativa (RPA) do Recife em 2024

RPA	Nº de pontos de alagamento
<b>RPA 1</b>	<b>7</b>
RPA 2	4
RPA 3	5
RPA 4	5
<b>RPA 5</b>	<b>13</b>
<b>RPA 6</b>	<b>7</b>

Fonte: Autor (2025).

A comparação entre esses dados e os padrões pluviométricos permite identificar correlações entre a intensidade das chuvas e a vulnerabilidade da drenagem urbana em cada região. Além disso, aspectos físicos e morfológicos do território — como a presença de áreas de morro, planícies e influência de marés — desempenham um papel crucial na explicação da distribuição dos alagamentos e serão considerados na análise a seguir.

Santana *et al.* (2018) analisando a relação entre a intensidade de chuva e ocorrência de alagamentos nos meses de abril e maio de 2016 no Recife, identificaram que o maior número de áreas alagadas não foi registrado no mês com maior precipitação acumulada (maio, com 478,8 mm), mas sim em abril, que teve uma precipitação de 332,1 mm. Isso foi identificado como o resultado de uma interação complexa entre precipitação concentrada em um curto período de tempo, nível

elevado de maré, baixo relevo das localidades afetadas, entupimento dos dispositivos de microdrenagem ou até mesmo ineficiência da coleta de lixo.

A análise cruzada entre o crescimento da área construída, a intensidade das chuvas e a ocorrência de alagamentos nas Regiões Político-Administrativas (RPAs) do Recife evidencia, por sua vez, diferentes dinâmicas espaciais de risco.

A RPA 3, responsável por mais de 40% da expansão urbana da cidade entre 2013 e 2023, concentrou também o maior número de eventos com registros de precipitação diária máxima em 2024. No entanto, apresentou apenas cinco pontos distintos de alagamento. Essa aparente contradição pode ser explicada pela predominância de regiões de morro em seu território, que favorecem o escoamento superficial e dificultam o acúmulo de água.

Por outro lado, a RPA 5, com crescimento urbano moderado (13,16%) e três eventos de precipitação diária máxima registrados em 2024, lidera em número de pontos de alagamento (13), o que sugere sobrecarga no sistema de drenagem e maior vulnerabilidade em áreas densamente construídas.

Já a RPA 1, apesar de apresentar crescimento urbano modesto (3,46%) e apenas um evento de chuva máxima, contabilizou sete pontos de alagamento. Isso pode estar relacionado à sua localização em áreas de aterro, com presença de rios e proximidade com o oceano, sendo fortemente influenciada pelas marés, o que dificulta o escoamento das águas pluviais.

A RPA 6, também com sete pontos de alagamento, combina áreas planas e de morro com alta densidade de edificações, o que pode comprometer a capacidade de infiltração e aumentar consideravelmente o escoamento superficial.

Esses resultados evidenciam que a ocorrência de alagamentos não depende exclusivamente do volume de chuvas ou da taxa de crescimento urbano, mas resulta de uma interação complexa entre relevo, uso do solo, densidade construída e eficiência dos sistemas de drenagem existentes.

A RPA 3, mesmo apresentando um maior crescimento absoluto da área construída e maior número de eventos chuvosos não foi considerada por ter a maioria dos seus bairros localizados em áreas de morro, onde há menor suscetibilidade a ocorrência de alagamentos, fato comprovado pelo reduzido número de atendimentos realizados pela Defesa Civil em bairros dessa RPA para ocorrências dessa natureza.

Considerando os dados analisados, a RPA 5 destaca-se pela combinação de fatores que favorecem os alagamentos no Recife: alta incidência de chuvas intensas, crescimento urbano expressivo e o maior número de pontos de alagamento registrados em 2024, refletindo sua elevada vulnerabilidade hidrológica. Silva Júnior (2015), com base em dados da Autarquia de Manutenção e Limpeza Urbana do Recife (EMLURB), também identificou essa mesma tendência, apontando 37 pontos de alagamento na RPA 5 no ano do estudo.

Além disso, a predominância de áreas de planície reforça a suscetibilidade da região a alagamentos. Por esses motivos, o bairro de Afogados, dentro da RPA 5, foi escolhido como área de estudo, já que concentra a maior área construída ( $3,11\text{ km}^2$ ) dentro da RPA e registrou o maior número de pontos de alagamento no município em 2024.

A planície costeira do município do Recife está inserida na bacia sedimentar Pernambuco-Paraíba, que se estende por cerca de 15 quilômetros no sentido norte-sul e 14 quilômetros no sentido leste-oeste, sendo delimitada, ao interior, pela Formação Barreiras, que conforma um semicírculo nas regiões norte, oeste e sudoeste (Santos *et al.*, 2019). Essa configuração geomorfológica contribui para a baixa declividade e a susceptibilidade a alagamentos em bairros como Afogados.

Dessa forma, as características físicas e urbanas de Afogados — relevo plano, alta densidade construtiva e proximidade de corpos hídricos — associadas à sua inserção na planície costeira do Recife, tornam o bairro particularmente vulnerável a eventos de chuva intensa. Essa vulnerabilidade é potencializada pela ocupação consolidada e, em alguns setores, irregular, que limita a permeabilidade do solo e a eficiência do sistema de drenagem.

#### **4.1.2 Caracterização da área de estudo**

Conforme mencionado no item anterior, a área de estudo (Figura 14) está localizada no bairro de Afogados, que pertence a 5<sup>a</sup> Região Político-Administrativa do Recife. O bairro possui uma área territorial de 369 hectares e uma população residente de 31.457 habitantes (IBGE, 2022). Situa-se em uma região de relevo predominantemente plano, com intensa urbanização e presença de canais artificiais e

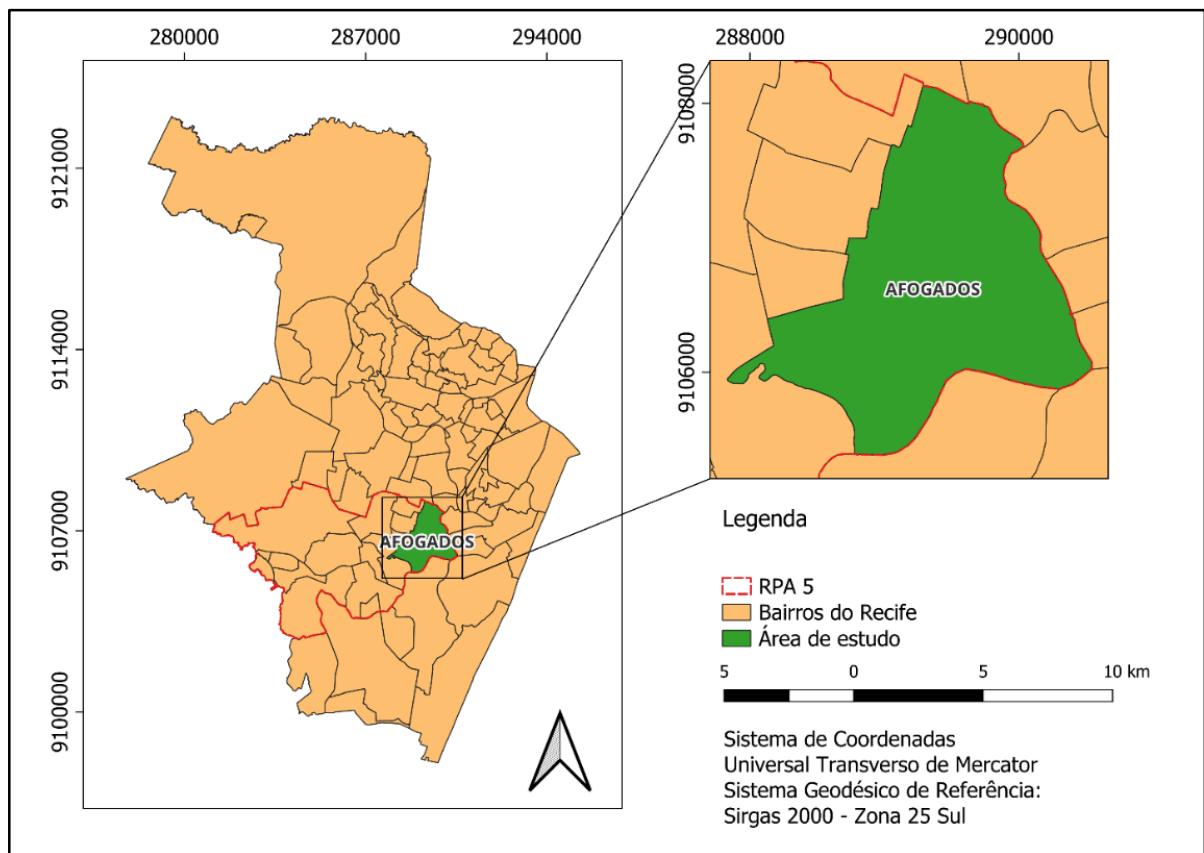
rios como o Braço do Capibaribe e o Tejipió, fatores que influenciam o escoamento superficial e a ocorrência de alagamentos.

A partir do Modelo Digital do Terreno (MDT), foi possível obter, com o auxílio do QGIS, os *rasters* das direções de drenagem e dos segmentos de fluxo que possibilitaram a identificação das microbacias dentro da área de estudo.

A microbacia escolhida (Figura 15), localizada na região central do bairro de Afogados tem sua importância devido a sua proximidade com o Terminal de Passageiros, o Metrô, o Mercado Público e a feira livre. O exutório, de modo particular, está localizado em um ponto crítico quanto a ocorrência de alagamentos, no cruzamento da Rua Vinte e Um de Abril com a Estrada dos Remédios.

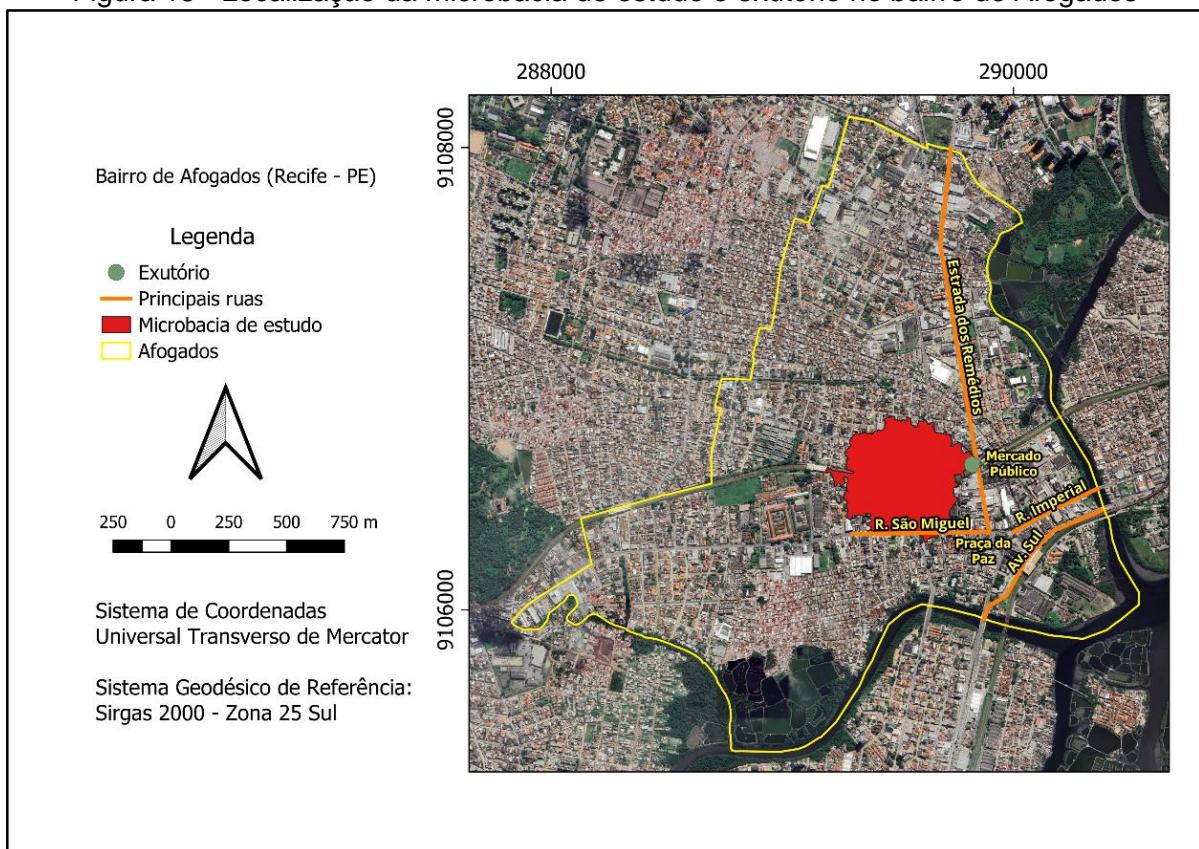
Afogados é considerado um dos centros secundários do Recife e, por isso, o centro comercial possui relevância não só para o bairro em si, mas para os demais bairros circunvizinhos.

Figura 14 - Área de estudo, bairro de Afogados, na RPA 5



Fonte: Autor (2025).

Figura 15 - Localização da microbacia de estudo e exutório no bairro de Afogados



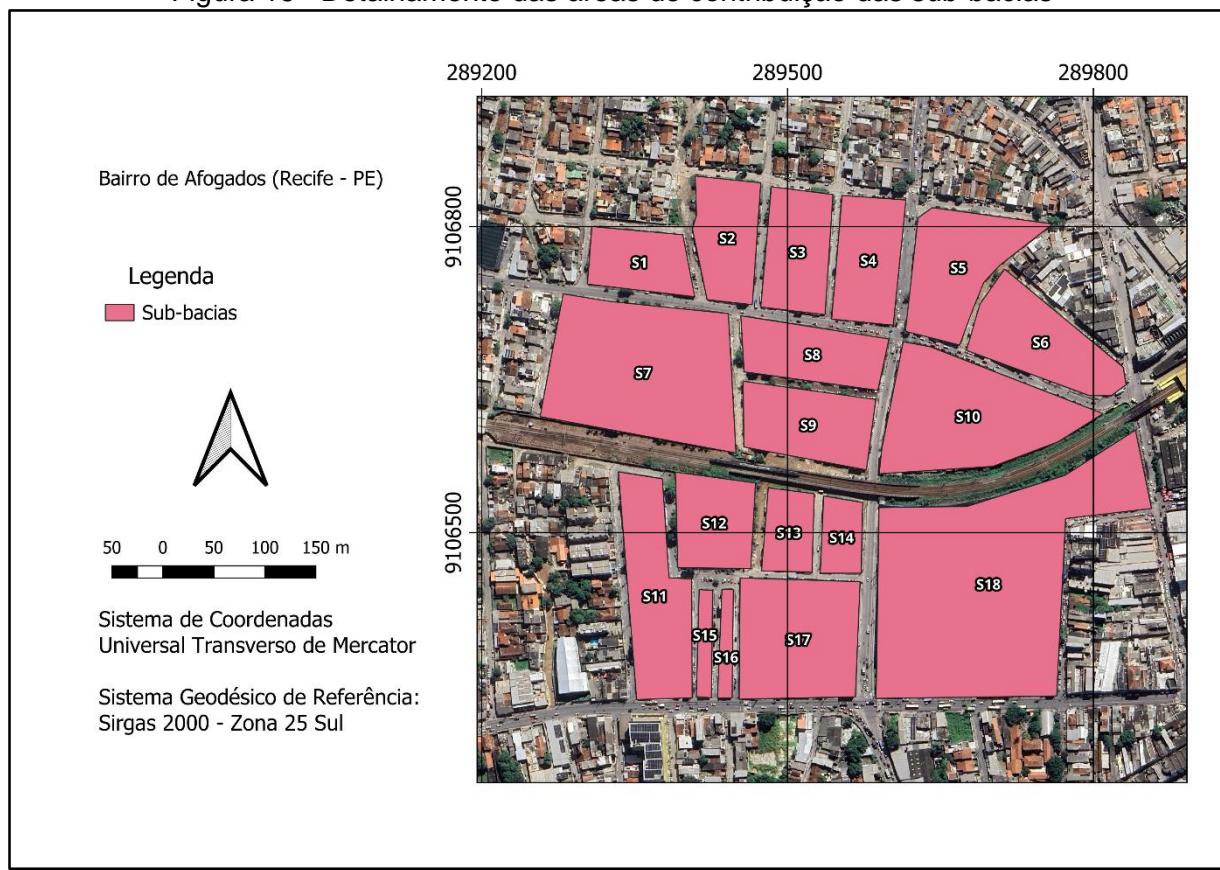
Fonte: Autor (2025).

Com a obtenção do limite da microbacia de estudo e a sobreposição com imagem do *Google Earth*, foi possível identificar as quadras inseridas dentro da bacia de contribuição. Os polígonos foram delimitados e identificados dentro do QGIS (Figura 16). Na Tabela 15 são apresentados os dados das sub-bacias utilizadas na modelagem.

Considerando que cada sub-bacia tem ao menos um ponto de drenagem foram demarcados esses pontos (nós) a partir do traçado natural das ruas, da inclinação do terreno e dos segmentos de fluxo. As cotas desses nós estão descritas na Tabela 16.

Por fim, fez-se a demarcação das vias (trechos) ligando os nós, cujos comprimentos foram obtidos com a calculadora de campo dentro do QGIS. Os resultados são apresentados na Tabela 17.

Figura 16 - Detalhamento das áreas de contribuição das sub-bacias



Fonte: Autor (2025). Fonte dos dados: *Google Earth* (2025).

Tabela 15 - Parâmetros geométricos das sub-bacias, na área de estudo

Nº da Sub-Bacia	Área (ha)	Largura (m)	Declividade média (%)	Área impermeável (%)
1	0,57	91,52	1,82	95,00%
2	0,69	57,71	1,89	95,00%
3	0,73	115,73	1,95	95,00%
4	0,76	120,98	1,42	95,00%
5	1,03	68,96	2,16	95,00%
6	0,96	110,20	2,18	95,00%
7	2,28	186,39	2,03	95,00%
8	0,74	140,14	2,13	95,00%
9	0,84	64,78	1,92	95,00%
10	1,69	81,31	1,85	95,00%
11	1,12	174,41	2,04	95,00%
12	0,67	91,01	2,06	95,00%
13	0,38	48,93	2,02	95,00%
14	0,28	41,03	1,79	82,50%
15	0,15	13,93	2,02	95,00%
16	0,14	12,93	1,47	95,00%
17	1,34	117,72	2,40	95,00%
18	3,99	216,71	2,83	95,00%

Fonte: Autor (2025). Fonte dos dados: *Google Earth* (2025); Pernambuco (2025).

Tabela 16 - Cotas dos nós da rede de drenagem, na área de estudo

Nó	Cota (m)
1	2,21
2	2,14
3	2,25
4	2,12
5	1,92
6	1,77
7	2,34
8	2,11
9	2,22
10	2,01
11	2,54
12	2,82
13	2,28
14	2,26
15	2,51
16	2,49
17	2,74
18	2,20

Fonte: Autor (2025). Fonte dos dados: Pernambuco (2025).

Tabela 17 - Comprimento dos trechos da rede de drenagem, na área de estudo

Trecho	Comprimento (m)
T1	45,34
T2	92,23
T3	94,12
T4	69,62
T5	60,2
T6	79,98
T7	85,39
T8	57,08
T9	23,77
T10	38,01
T11	78,91
T12	46,18
T13	28,4
T14	206,51
T15	66,43
T16	74,53
T17	110,21
T18	115,98

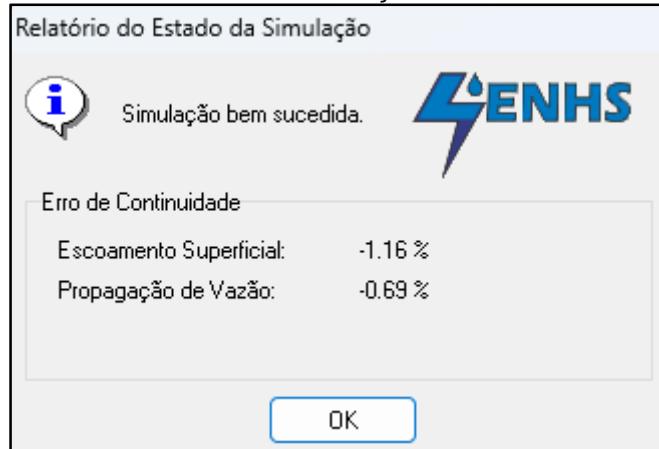
Fonte: Autor (2025). Fonte dos dados: Google Earth (2025).

#### 4.2 VOLUME DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL GERADO ATUALMENTE

A simulação da rede atual no *Storm Water Management Model* (SWMM) foi bem-sucedida, apresentando pequenos erros de continuidade, mas ainda dentro do padrão de confiabilidade. Erros acima de 10% significam que o modelo não é confiável e os parâmetros precisam ser revistos, conforme o SWMM 5.0 Manual do Usuário

(Rossman, 2012). Na Figura 17 tem-se o relatório de estado da simulação. Não foi realizada calibração do modelo, contudo, os trechos identificados com as maiores vazões e os pontos onde houve inundação dos nós coincidiram com pontos críticos de alagamentos conhecidos já levantados pela Defesa Civil Municipal, reforçando a representatividade do modelo.

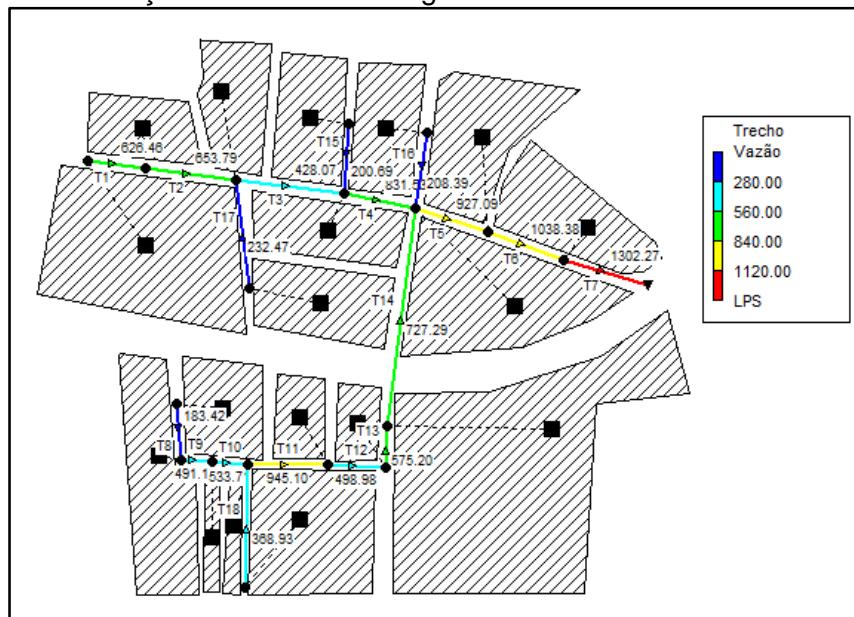
Figura 17 - Relatório de estado da simulação da rede sem bacia de detenção



Fonte: Autor (2025).

Na Figura 18 é possível observar as vazões nos trechos da rede de drenagem modelada no SWMM para a situação atual sem o uso da bacia de detenção no instante de 30 minutos de chuva. Os trechos T5, T6 e T7, na Rua Vinte e Um de Abril, próximo ao exutório e o trecho T11, na Rua Londrina, apresentaram as máximas vazões, que podem ser constatadas na Tabela 18.

Figura 18 - Simulação da rede de drenagem no SWMM no instante de 30 minutos



Fonte: Autor (2025).

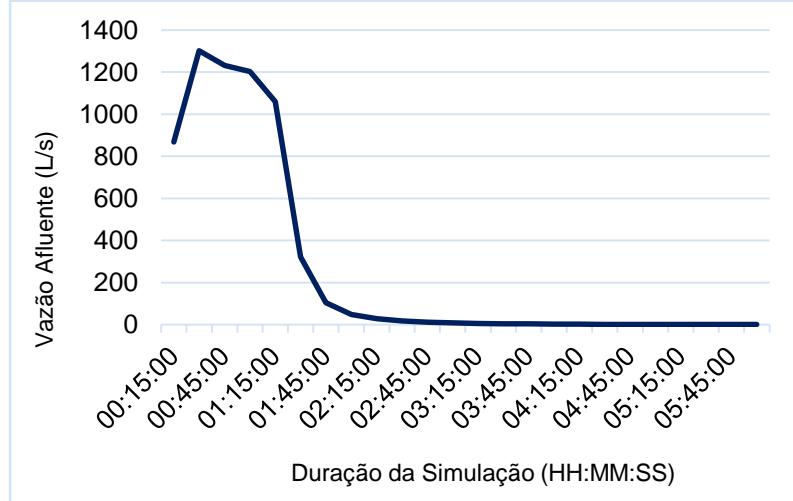
Tabela 18 - Vazão máxima nos trechos da rede sem bacia de detenção

Trecho	Vazão Máxima (L/s)
T1	775,48
T2	704,95
T3	462,84
T4	960,63
T5	982,71
T6	1108,36
T7	1361,18
T8	215,86
T9	250,57
T10	282,51
T11	234,94
T12	618,05
T13	591,68
T14	1057,23
T15	530,56
T16	596,77
T17	784,10
T18	461,76

Fonte: Autor (2025).

A vazão máxima no exutório, identificado pelo triângulo à jusante do trecho T7 (Figura 18), ocorreu em 20 minutos de precipitação, com um pico de 1361,18 L/s. Na Figura 19 exibe-se a série temporal da vazão total afluente no exutório.

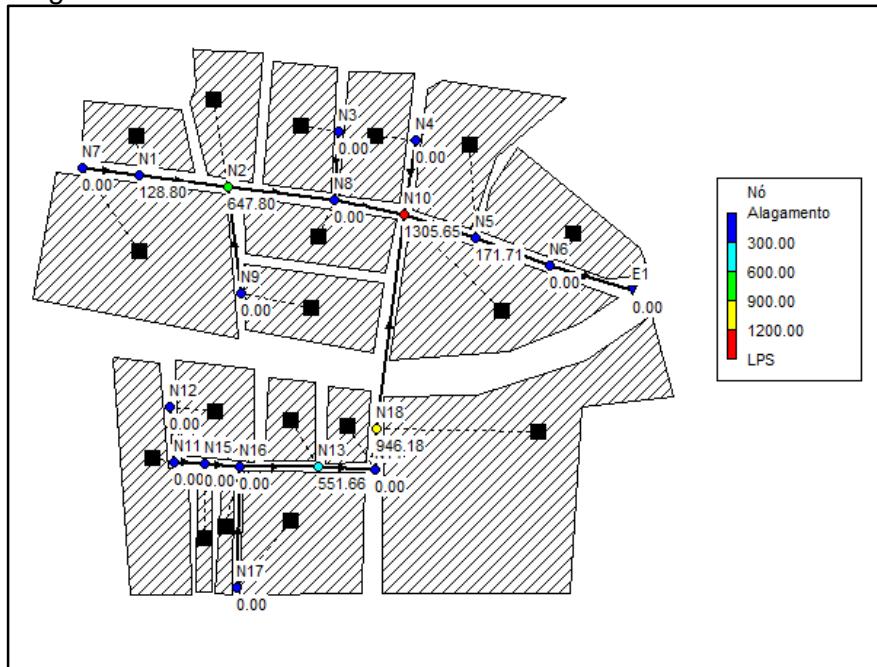
Figura 19 - Hidrograma do exutório da rede sem bacia de detenção



Fonte: Autor (2025).

O relatório de estado mostrou que houve inundação dos nós 1, 2, 5, 8, 10, 13, 15 e 18, isto é, os nós foram alagados por uma fração de tempo. Na Figura 20 ilustra-se as posições dos nós inundados e a Tabela 19 os valores das máximas vazão nos nós.

Figura 20 - Vazões nos nós inundados no instante de 30 minutos



Fonte: Autor (2025).

Tabela 19 - Vazão máxima e volume total nos nós inundados

Trecho	Vazão máxima (L/s)	Volume total inundado $10^6$ L
N1	320,53	0,198
N2	737,65	1,700
N5	235,9	0,293
N8	30,67	0,004
N10	1454,75	3,900
N13	688,08	1,163
N15	116,35	0,032
N18	1108,08	2,428

Fonte: Autor (2025).

Deste modo, percebe-se a necessidade da implantação de técnicas compensatórias para conter os alagamentos à jusante, principalmente, no centro comercial, reduzindo o pico de vazão no exutório.

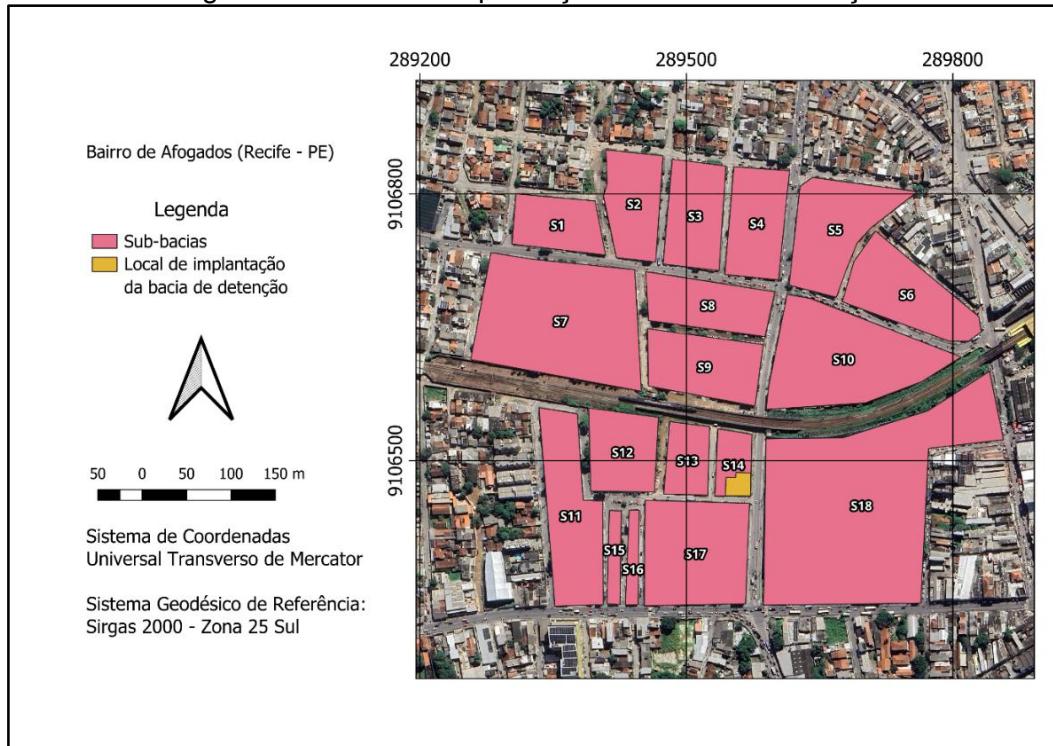
#### 4.3 DIMENSIONAMENTO DA BACIA DE DETENÇÃO

A hipótese de implantação de bacias de detenção ao longo das vias foi considerada. Entretanto, esse tipo de solução acarretaria sérias restrições à mobilidade urbana, além de demandar custos mais elevados de execução e manutenção por parte do poder público, tornando-se uma alternativa pouco viável para a realidade local.

Nesse contexto, buscou-se identificar áreas livres de ocupação que pudessem ser aproveitadas sem a necessidade de desapropriações onerosas. Como resultado, foi identificado um terreno desocupado na sub-bacia 19, que reúne condições favoráveis para a construção de uma bacia de detenção.

A utilização dessa área apresenta como vantagens: (i) menor impacto sobre a dinâmica urbana; (ii) otimização do aproveitamento de espaços já disponíveis; (iii) redução de custos com desapropriação; e (iv) maior eficiência no controle do escoamento superficial na bacia de contribuição. Na Figura 21 ilustra-se a área selecionada.

Figura 21 - Local de implantação da bacia de detenção



Fonte: Autor (2025).

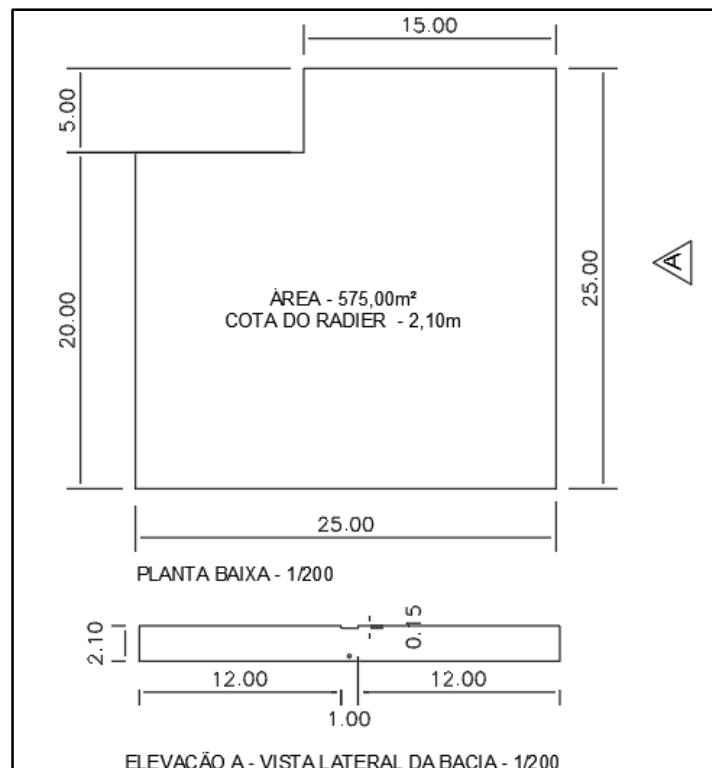
Para o dimensionamento da bacia de detenção foi utilizada a área disponível do tópico anterior, condicionantes de profundidade devido à topografia do local, recomendações da literatura e do software *Storm Water Management Model* (SWMM), que propõe valores para os parâmetros dos dispositivos. A Figura 22 apresenta a planta baixa e a vista lateral da bacia com as dimensões do vertedor e do orifício de descarga.

No SWMM, foi ajustada a área de contribuição do sub-bacia 19 e inserida uma unidade de reservatório. A curva da bacia foi determinada como tabular, uma vez que

a área é constante ao longo da profundidade. Para o vertedor adotou-se uma altura de 15 cm e largura de 1,0 m. Para o orifício de descarga de fundo adotou-se um diâmetro de 20 cm, offset do fundo de 20 cm e um coeficiente de descarga de 0,65, conforme recomendação do Manual do SWMM Brasil (Rossman, 2012).

Após o lançamento dos dispositivos no SWMM, foram feitos alguns testes alterando as dimensões de cada objeto. A proposta foi atenuar as vazões devido as áreas de contribuição dos lotes 11, 12, 13, 14, 15, 16 e 17, reduzindo o pico no exutório. Foi ativado o modelo de onda dinâmica, considerando que no modelo anterior alguns trechos estavam ficando cheios por alguns minutos, podendo provocar retornos a montante e causando instabilidades.

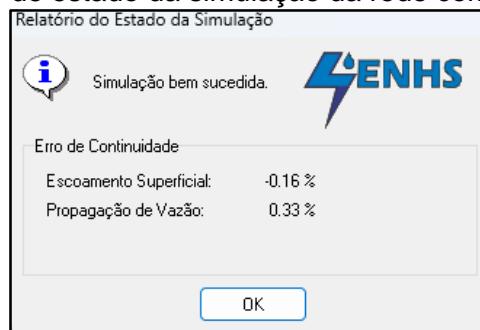
Figura 22 - Planta baixa e vista da bacia de detenção projetada



Fonte: Autor (2025).

Na Figura 23 apresenta-se o relatório de estado para o modelo com a bacia de detenção. Os erros de continuidade estão relacionados a conservação das massas nos cálculos do escoamento superficial e da propagação de fluxo. Esses erros representam a diferença em porcentagem entre o fluxo que entra, a quantidade armazenada e o fluxo que sai.

Figura 23 - Relatório de estado da simulação da rede com a bacia de detenção



Fonte: Autor (2025).

É possível observar na Figura 24 a expressiva redução na vazão dos trechos em relação a Figura 20. A imagem foi obtida no instante de 45 minutos de simulação. O exutório atingiu a vazão máxima de 510,39 L/s, uma redução de 62,5% em relação ao modelo sem a bacia de detenção, conforme a série temporal da afluência total no nó (Figura 25). Cordeiro (2019), avaliando a drenagem de uma sub-bacia no município de Custódia – PE, utilizando o SWMM, obteve uma redução da vazão de pico de 45,41% para a simulação da implantação de um reservatório com capacidade 3200,00 m<sup>3</sup>.

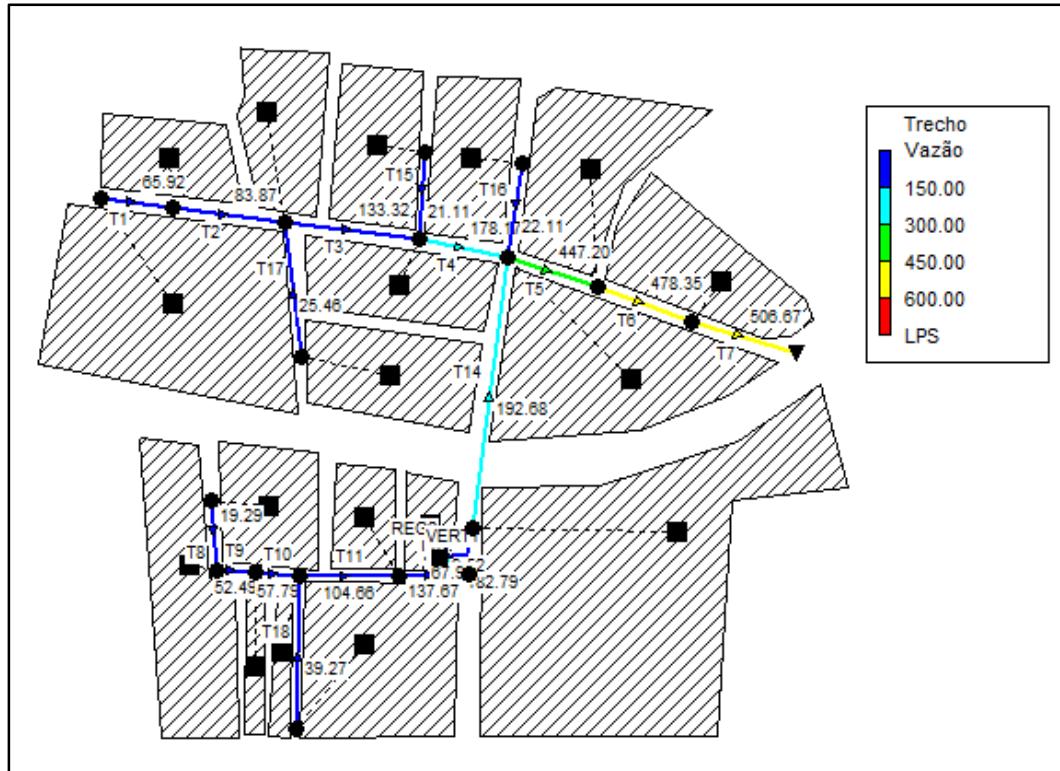
Não houve sobrecarga ou inundação em nenhum dos nós e em nenhum dos trechos. Na Tabela 20 exibe-se as vazões máximas após a implantação da bacia de detenção, e o trecho de maior vazão foi o T7 à montante do exutório.

Tabela 20 - Vazões máximas nos trechos da rede com bacia de detenção

Trecho	Vazão máxima (L/s)
T1	111,58
T2	129,83
T3	171,1
T4	220,96
T5	449,03
T6	480,63
T7	510,39
T8	36,88
T9	32,31
T10	43,74
T11	33,58
T12	86,1
T13	92,21
T14	159,49
T15	203,64
T16	65,45
T17	192,74
T18	463,77

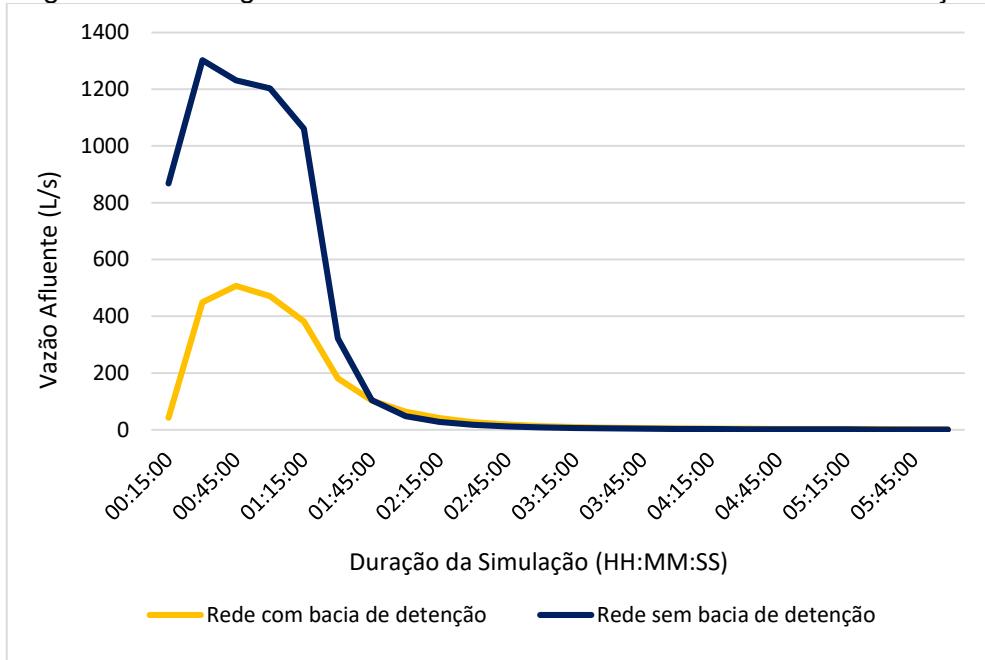
Fonte: Autor (2025).

Figura 24 - Simulação da rede de drenagem no SWMM com a bacia de detenção no instante de 45 minutos



Fonte: Autor (2025).

Figura 25 - Hidrograma do exutório da rede com e sem bacia de detenção



Fonte: Autor (2025).

A implantação da bacia de detenção de águas pluviais demonstrou elevada eficiência na atenuação dos picos de vazão a jusante, uma vez que reteve o

escoamento superficial durante o período de maior intensidade da chuva e promoveu sua liberação de forma mais gradual e controlada.

Embora a capacidade total projetada para o reservatório seja de 1.121,25 m<sup>3</sup>, a modelagem realizada no SWMM indicou que o maior volume efetivamente acumulado foi de aproximadamente 304,00 m<sup>3</sup>, o que corresponde a apenas 27% da capacidade disponível. A vazão máxima descarregada pelo dispositivo foi de 331,68 L/s, valor significativamente inferior às condições sem a implantação da bacia de detenção.

Esses resultados evidenciam que as dimensões da bacia poderiam ser ajustadas, visto que existe um volume útil ocioso que não foi mobilizado durante o evento simulado. O desempenho observado garante um elevado nível de segurança contra alagamentos locais, evitando o transbordamento e mantendo a estabilidade hidráulica do sistema. Os dispositivos de descarga — o orifício de fundo e o vertedor — também se mostraram adequados, cumprindo a função de restringir o fluxo e assegurar uma vazão regular a jusante.

Nesse sentido, recomenda-se que pesquisas futuras explorem alternativas de redução do volume do reservatório, de modo a otimizar o dimensionamento e compatibilizar a eficiência hidráulica com o uso mais racional do espaço e dos recursos envolvidos.

Diante do exposto, a adoção de uma bacia de detenção na área de estudo contribuiria de forma significativa para a mitigação dos alagamentos recorrentes no bairro de Afogados, reduzindo os custos associados a intervenções mais onerosas na rede de drenagem urbana, como a substituição ou ampliação de condutos existentes.

A análise realizada demonstrou que a implantação da bacia de detenção contribuiu de forma significativa para a redução dos riscos de alagamento na área de estudo, permitindo armazenar parte do escoamento gerado durante o pico da chuva, liberando-o de maneira controlada e evitando a sobrecarga imediata da rede.

Assim, evidencia-se a relevância das medidas compensatórias como alternativas eficientes para o manejo de águas pluviais em áreas urbanas densamente ocupadas, reduzindo a ocorrência de pontos críticos de alagamento sem a necessidade de grandes intervenções na infraestrutura existente. Outras medidas como pavimentos permeáveis, jardins de chuva, telhados verdes e trincheiras de

infiltração poderiam ser aplicadas de forma complementar, ampliando a capacidade de retenção e infiltração da água de chuva no meio urbano.

A adoção integrada desses dispositivos contribui para a redução do volume de escoamento, o que reforça a resiliência do sistema de drenagem e auxilia no enfrentamento de eventos extremos cada vez mais frequentes em decorrência das mudanças climáticas.

## 5 CONCLUSÃO

O processamento do índice NDBI aliado à análise do uso e ocupação do solo na cidade do Recife foi fundamental na identificação das áreas com maior crescimento da área construída entre 2013 e 2023, com destaque para as RPAs 3, 4 e 5, que concentraram os maiores percentuais do crescimento urbano do Recife entre 2013 e 2023, respondendo por 40,13%, 26,30% e 13,16%, respectivamente.

A pluviometria do município, avaliada pelos dados das máximas chuvas diárias de quinze postos pluviométricos indicou as regiões mais suscetíveis a eventos de precipitação intensa, sendo ocupadas também pelas RPAs 3, 4 e 5.

Os dados históricos de alagamentos confirmaram a identificação da área mais vulnerável à ocorrência de transtornos devido às chuvas intensas, do aumento da impermeabilização do solo e da sobrecarga do sistema de drenagem atual, justificando a escolha da área de estudo com sendo a RPA 5 e, de modo particular, o bairro de Afogados.

As características físicas e socioeconômicas do bairro de Afogados condicionaram a aplicação da intervenção em uma área central do bairro, importante devido a sua influência local e regional tanto no aspecto da mobilidade urbana, quanto comercial.

Os resultados obtidos com a modelagem hidrológica demonstraram que a adoção de técnicas compensatórias, como a bacia de detenção, pode desempenhar papel fundamental na mitigação de alagamentos em áreas urbanas. No caso da área de estudo, a bacia de detenção conseguiu reduzir a vazão afluentes no exutório de 1361,18 L/s para 510,39 L/s, armazenando volumes e liberando-os de forma controlada, o que confirma sua eficiência como alternativa técnica para a drenagem sustentável.

Além disso, observou-se que, mesmo com capacidade muito superior ao volume efetivamente utilizado (27,00%), o reservatório apresentou desempenho satisfatório, indicando a possibilidade de ajustes no dimensionamento, sem comprometer a segurança hidráulica. Essa flexibilidade reforça a viabilidade do uso de tais estruturas no contexto urbano, permitindo conciliar economia de recursos e eficiência operacional.

De forma mais ampla, o estudo evidencia que a implementação de soluções baseadas em infraestrutura verde e medidas de retenção contribui não apenas para o controle imediato de cheias, mas também para a adaptação das cidades frente aos efeitos das mudanças climáticas e do crescimento urbano desordenado. Ao integrar técnicas compensatórias às redes de drenagem existentes, é possível reduzir custos de grandes obras de canalização, ao mesmo tempo em que se promove maior resiliência urbana e segurança para a população.

Assim, a experiência apresentada reforça a importância de incorporar técnicas compensatórias como parte essencial do planejamento e da gestão de águas pluviais, servindo como referência para projetos futuros e políticas públicas voltadas à mitigação de alagamentos em áreas vulneráveis.

## REFERÊNCIAS

- ALENCAR, A. V.; LAFAYETTE, F. B.; BATISTA FILHO, G.; SILVA, P. O.; VASCONCELOS, R. F. A. (org.). **Manual de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais do Recife**. Recife: Prefeitura da Cidade do Recife; Secretaria de Infraestrutura e Serviços Urbanos – SISUR; Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana – EMLURB, 145 pp, 2016.
- BACALHAU, J. R.; RIBEIRO NETO, A.; OLIVEIRA, L. M. M.. Aplicação de índice de vegetação no monitoramento da seca: açude Algodões no sertão pernambucano. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, 2 (3): 283–293, 2017. <https://doi.org/10.24221/jeap.2.3.2017.1449.283-293>
- BARBOSA, A. B. B.; NAKAKOJI, N. K. N.; NARUSAWA, I. D. S.; ARAÚJO, S. R.. SIG na avaliação da erosão hídrica na bacia do rio Capim, Pará. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, 18 (9): 1–16, 2024. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n9-195>
- BATISTA FILHO, G.. Macrodrrenagem: a estrutura fluida da cidade do Recife. VASCONCELOS, R. F. A. (Org.). **Recife Drenagem Urbana**. Recife: Cepe, p. 78-99, 2022.
- BELL, C. D.; McMILLAN, S. K.; JEFFERSON, A. J.. Hydrological response to stormwater control measures in urban watersheds. **Journal of Hydrology**, 541: 1488–1500, 2016. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.049>
- BEZERRA, J. C.. **Telhados verdes: métodos de pesquisa e propriedades**. Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal - RN, 35 f., 2018.
- BIRCK, M. B.; BEZERRA, M. C.. A Drenagem Sustentável e seus desafios para os projetos de urbanismo: O caso do setor habitacional noroeste, Brasília-DF. Pluris. - Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável. **Anais...** Maceió - AL, 12 pp., 2016.
- BRASIL. **Lei Nº 14.026** de 15 de julho de 2020. Dispõe sobre a Política Nacional de Saneamento Básico. Brasília, DF. Presidência da República, 2020.
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Instrução Normativa nº 01**, de 24 de agosto de 2012. Estabelece procedimentos e critérios para a decretação de situação de emergência ou estado de calamidade pública pelos Municípios, Estados e pelo Distrito Federal, e para o reconhecimento federal das situações de anormalidade decretadas pelos entes federativos e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 2012.
- CABRAL, J.; SANTOS, S. M.. Técnicas Compensatórias na Drenagem. VASCONCELOS, R. F. A. (Org.). **Recife Drenagem Urbana**. Recife: Cepe, pp. 48-77, 2022.
- CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**, Oficina de Textos, São Paulo, 2014.

CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. **Mapa Interativo – Rede Observacional para Monitoramento de Risco de Desastres Naturais.** [s.l.], [s.d.]. <https://mapainterativo.cemaden.gov.br/>. Acesso em: 09 setembro 2025.

CORDEIRO, A. S. L.. **Utilização do SWMM – Storm Water Management Model como ferramenta de planejamento de drenagem urbana.** Trabalho de Conclusão de Curso da Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru – PE, 76 pp., 2019.

CORRÊA, A. C. B.. Contribuição à Análise do Recife como um Geossistema Urbano. **Revista de Geografia**, 23 (3): 86-102, 2009. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/revistageografia/article/view/228672> Acesso em: 18 fevereiro 2025.

COSTA JÚNIOR, L. L.; BARBASSA, A. P.. Parâmetros de projeto de microrreservatório, de pavimentos permeáveis e de previsão de enchentes urbanas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 11 (1): 46-54, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/X4JNK5VY9W3YVnxBvzwxmPB/?format=pdf&lang=pt> Acesso em: 14 abril 2025.

CRUZ, M. A. S.; SOUZA, C. F.; TUCCI, C. E. M.. Controle da Drenagem Urbana no Brasil: Avanços e Mecanismos para sua Sustentabilidade. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, **Anais**.., 18 p., 2007.

DINIZ, F. R.. Por um urbanismo sensível às águas: Recife, a ocupação urbana, a natureza e suas dinâmicas. VASCONCELOS, R. F. A. (Org.). **Recife Drenagem Urbana**. Recife: Cepe, pp. 26-47, 2022.

FARIA, T. J. P.. Os projetos e obras do engenheiro Saturnino de Brito e mudança na paisagem urbana. **Revista Geografia Ensino & Pesquisa**, 19 (edição especial): 115-122, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5902/2236499419375>

FRANÇA, A. F.; TAVARES JÚNIOR, J. R.; MOREIRA FILHO, J. C. C. Índices NDVI, NDWI e NDBI como ferramentas ao mapeamento temático do entorno da Lagoa Olho d'Água, em Jaboatão dos Guararapes-PE. Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação, 4., 2012, Recife - PE. **Anais**, p. 1–9. Disponível em: <https://www3.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIV/CD/>. Acesso em: 13 abril 2025.

FRANCO, E. J.. **Dimensionamento de bacias de detenção das águas pluviais com base no método racional.** Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 155 pp., 2004.

GOMES, R. S.; LIMA, K. C.. *Influence of the modes of climate variability in the tropical Pacific and Atlantic on accumulated rainfall and reservoir water volume in the Northeast Brazil*. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 11, p. 5331–5349, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.7132>

GOOGLE EARTH. Versão 7.3. 2025. Disponível em: <https://earth.google.com/web/>. Acesso em: 28 junho 2025.

GOULART, Letícia Pena; MATSUOKA, Jaqueline Vicente. Análise das áreas suscetíveis a alagamentos e inundações na área urbana do município de Uberlândia – MG utilizando geoprocessamento e o método de análise hierárquica AHP. **GETEC – Gestão, Tecnologia e Ciências**, 10 (34): 21-44, 2021. Disponível em: <https://revistas.fucamp.edu.br/index.php/getec/article/view/2566>. Acesso em: 13 abril 2025.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico 2022: resultados preliminares**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/censo/>. Acesso em: 04 setembro 2025.

KONG, F.; BAN, Y.; YIN, H.; JAMES, P.; DRONOVA, I.. Modeling stormwater management at the city district level in response to changes.land use and low impact development. **Environmental Modelling and Software**, 95: 132-142, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.021>

LACERDA, F. F.. **Tendências de temperatura e precipitação e cenários de mudanças climáticas de longo prazo no Nordeste do Brasil e em ilhas oceânicas**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 110 pp., 2015.

LAFAYETTE, F. B.; SILVA, M. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, P. O.; GUSMÃO, R. D.. Plano de Gestão da Manutenção da Rede de Drenagem da Cidade do Recife. XIV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. **Anais..**, Maceió– AL, p. 5–6, 2018.

LECHIU, B. C. G.; OLIVEIRA FILHO, P. C.; SOUSA, J. B.. Utilização de imagens orbitais de alta resolução em superfícies com níveis distintos de impermeabilização do solo urbano: caso Irati-PR. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, 33 (2): 127-140, 2012. <https://doi.org/10.5433/1679-0375.2012v33n2p127>

LEONARDO, H. R. A. L.; ALMEIDA, D. N. O.; AMORIM, A. R.; PAIVA, A. L. R.; OLIVEIRA, L. M. M.; SANTOS, S. M. Remote sensing applied to biophysical parameters and land cover to identify urban heat islands in Recife (PE), Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais** (RBCIAMB), v. 60, e2107, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z2176-94782107>.

LIMA, J. F.; OLIVEIRA, L. M. M.; FARIA, A. A. M.; SILVA, B. B.; RODRIGUES, D. F. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.. Geotecnologia para Caracterização do Albedo e Temperatura da Superfície no Sertão de Pernambuco, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, 44: 35481, 2021. [https://doi.org/10.11137/1982-3908\\_2021\\_44\\_35481](https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_35481)

LIMA, L. D. B.; SILVA, C. L. M.; OLIVEIRA, C. M. E.; JUNIOR, J. C. R.; GOMES, D. P. P.. Mapeamento de áreas suscetíveis a inundações na cidade do Recife-PE/Brasil. **Espaço em Revista**, Catalão, v. 27, n. 1, p. 21–44, 2025. DOI: <https://doi.org/10.70261/er.v27i1.74841>

LUIZ-SILVA, W.; OSCAR-JÚNIOR, A. C.; CAVALCANTI, I. F. A.; TREISTMAN, F.. *An overview of precipitation climatology in Brazil: space-time variability of frequency and*

*intensity associated with atmospheric systems.* **Hydrological Sciences Journal**, v. 66, n. 2, p. 289–308, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1863969>

**MAPBIOMAS. Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso do Solo do Brasil.** Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia – IPAM, 2023. Disponível em: <https://mapbiomas.org> Acesso em: 12 abril 2025.

MEDEIROS, F. J.; OLIVEIRA, C. P.. *Dynamical aspects of the recent strong El Niño events and its climate impacts in Northeast Brazil.* **Pure and Applied Geophysics**, v. 178, p. 2315–2332, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02758-3>

MEDEIROS, F. J.; OLIVEIRA, C. P.; GOMES, R. S.; SILVA, M. L.; CABRAL JÚNIOR, J. B.. *Hydrometeorological conditions in the semiarid and east coast regions of Northeast Brazil in the 2012-2017 period.* **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 93, n. 1, e20200198, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120200198>

MELO, T. A. T.; COUTINHO, A. P.; CABRAL, J. J. S. P.; ANTONINO, A. C. D.; CIRILO, J. A.. Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, 14 (4): 147-165, 2014. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212014000400011>

MELO, T. A. T.; COUTINHO, A. P.; SANTOS, J. B. F.; CABRAL, J. J. S. P.; ANTONINO, A. C. D.; LASSABATERE, L.. Trincheira de infiltração como técnica compensatória no manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, 16 (3): 53–72, 2016. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000300092>

MOURA, M. O.; CUNICO, C.; NÓBREGA, R. S.; DUARTE, C. C.. Desastres hidrometeorológicos na região Nordeste do Brasil: distribuição espaço - temporal dos reconhecimentos de Estado de Calamidade Pública. **Caderno de Geografia**, 26 (número especial 2): 259 – 271, 2016. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2016v26nesp2p259>

NARASIMHAN, B.; SREETHU, S.; MODI, K.; ARUN, R. S.; ANELLI, R.; IMANI, M.; BHALLAMUDI, S. M.. Sustainable urban drainage systems. **Technological Solutions for Water Sustainability: Challenges & Prospects - Towards a Water Secure India**, Londres. IWA Publishing, 255-264, 2023. [https://doi.org/10.2166/9781789063714\\_0255](https://doi.org/10.2166/9781789063714_0255)

NICOLETE, D. A. P.; PIROLI, E. L. Avaliação do impacto das mudanças de uso e cobertura do solo sobre o escoamento superficial. **Mercator** (Fortaleza), 23: 23012, 2024. <https://doi.org/10.4215/rm2024.e23012>

NIEMI, T.J.; KOKKONEN, T.; SILLANPÄÄ, N.; SETÄLÄ, H.; KOIVUSALO, H.. Automated Urban Rainfall–Runoff Model Generation with Detailed Land Cover and Flow Routing. **Journal of Hydrologic Engineering**, 24 (5): 04019011, 2019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001784](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001784)

OLIVEIRA, P.; DANTAS, M.; CABRAL, J. A Gestão do Sistema de Drenagem do Recife. VASCONCELOS, R. F. A. (Org.). **Recife Drenagem Urbana**. Recife: Cepe, 2022. p. 136-160.

OLIVEIRA, P.T.; SANTOS E SILVA, C.M.; LIMA, K.C. Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 130, n. 1, p. 77-90, 2017.

PARKINSON, J.; MILOGRANA, J.; CAMPOS, L. C.; CAMPOS, R.. Drenagem Urbana Sustentável no Brasil. **Relatório do Workshop em Goiânia-GO**, 24 pp., 2003.

PERNAMBUCO. Governo do Estado de Pernambuco. Plataforma PE3D: mapeamento tridimensional de Pernambuco [online]. Disponível em: <https://pe3d.pe.gov.br/mapa.php>. Acesso em: 24 setembro 2025.

RAMOS, C. L.; BARROS, M. T. L.; PALOS, J. C. F.. **Diretrizes básicas para projeto de drenagem urbana no município de São Paulo**. São Paulo: Fundação centro tecnológico de hidráulica, 289 pp., 1999. Disponível em: <https://pdfcoffee.com/download/drenagem-urbana-so-paulo-cetesb-pdf-free.html>. Acesso em: 14 abril 2025.

RECIFE. **Lei Ordinária Nº 18112/2015**. Dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do “telhado verde”, e construção de reservatório de acúmulo ou de retardo de escoamento de águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências. Recife, PE. Prefeitura Municipal de Recife, 2015.

RECIFE. **Lei Complementar Nº 02** de 23 de abril de 2021. Institui o Plano Diretor do Município do Recife, revogando a Lei Municipal nº 17.511, de 29 de dezembro de 2008. Recife, PE. Câmara Municipal de Recife, 2021.

RECIFE. Prefeitura da Cidade do Recife. Portal de Dados Abertos. Disponível em: <http://dados.recife.pe.gov.br/>. Acesso em: 20 junho 2025.

RECIFE. Prefeitura da Cidade do Recife. Prefeitura do Recife entrega primeiro parque alagável da capital. Disponível em: <https://www2.recife.pe.gov.br/noticias/29/11/2024/prefeitura-do-recife-entrega-primeiro-parque-alagavel-da-capital>. Acesso em: 23 setembro 2025.

ROCHA, M. J. D.; PEREIRA, S. P.; LIMA NETO, I. E.. Integração do SWMM e ferramentas SIG para modelagem hidrológico-hidráulica de bacia complexa. **Engenharia sanitária e ambiental**, 26 (3): 451-459, 2021. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220190328>

RODRIGUES, D.T.; GONÇALVES, W.A.; SPYRIDES, M.H.C.; SANTOS E SILVA, C.M. *Spatial and temporal assessment of the extreme and daily precipitation of the Tropical Rainfall Measuring Mission satellite in Northeast Brazil*. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 2, p. 549-572, 2019.

ROSSMAN, L. A.. **SWMM 5.0: manual do usuário**. Tradução: Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento – LENHS/UFPB. João Pessoa - PB: Universidade Federal da Paraíba, 2012. <https://www.ct.ufpb.br/lenhs/swmm/> Acesso em: 02 setembro 2025.

RUHOFF, A. L.; SILVA, B. B.; ROCHA, H. R.. Determinação da irradiância solar no topo da atmosfera para cálculo do albedo e balanço de energia a partir de imagens

LANDSAT 8 OLI. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 2015, João Pessoa-PB. **Anais...**, 4495-4502, 2015.

SALGUEIRO, C. O. B. **Impacto do armazenamento da água de chuva no volume escoado para o sistema de drenagem pluvial**. 2021. 80 pp. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

SANTANA, D. W. S.; SANTOS, M. C. L.; BARBOSA, J. M. A.; NASCIMENTO, E. J. J. ; DUARTE, C. C.. Análise da relação entre a intensidade da chuva e ocorrências de alagamentos nos meses de abril e maio de 2016 na cidade do Recife, Pernambuco. **Paisagens & Geografias**, 3 (número especial 2): 33-44, 2018. Disponível em: <https://www.paisagensegeografias.revistas.ufcg.edu.br/index.php/A1p7D/article/view/34> Acesso em: 02 setembro 2025.

SANTOS, L. D. J.; GONÇALVES, R. B.; CABRAL, C. J.; GIRÃO, O.. Vulnerabilidades a eventos pluviais de alta magnitude da cidade do Recife – Pernambuco/Brasil. **Revista de Geografia**, 9 (2): 160–185, 2019. <https://doi.org/10.34019/2236-837X.2019.v9.18079>

SILVA, F. M.; COSTA JUNIOR, N. P.; LIMA, Z. M. C.. Avaliação microclimática de Natal/RN através de técnicas de sensoriamento remoto: uma contribuição aos estudos do clima urbano. **Sociedade e Território**, 26 (2): 163 – 180, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/sociedadeeterritorio/article/view/5303> (acesso: 02/09/25).

SILVEIRA, N. T.; SILVA, M. A.; SOARES, G. A. S.; BELLO, R. K. S.; PINHEIRO NETO, V. R.; GALVÍNCIO, J. D.. Precipitação pluviométrica no Submédio São Francisco: levantamento bibliográfico das bacias hidrográficas de Pernambuco. **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 5, n. 3, p. 79–95, 2024. Disponível em: <https://revistas.ufpe.br/revistas/rbsr>. Acesso em: 14 out. 2025.

SILVA JÚNIOR, M. A. B.. **Alternativas compensatórias para controle de alagamentos em localidade do Recife-PE**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife - PE, 153 pp., 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/321903367\\_Alternativas\\_compensatorias\\_para\\_controle\\_de\\_alagamentos\\_em\\_localidade\\_do\\_Recife-PE](https://www.researchgate.net/publication/321903367_Alternativas_compensatorias_para_controle_de_alagamentos_em_localidade_do_Recife-PE). Acesso em: 14 outubro 2025.

SILVA JÚNIOR, M. A. B.; SILVA, S. R.; CABRAL, J. J. S. P.. Compensatory alternatives for flooding control in urban areas with tidal influence in Recife – PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 22 (19), 2017. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716040>

SILVA, J. R.. **Avaliação da técnica do barril de chuva como medida compensatória em Natal/RN**. 2022. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/56049>. Acesso em: 14 outubro 2025.

SILVA, P. O.; CABRAL, J. J. S. P.. Atenuação de Picos de Vazão em Área Problema: Estudo Comparativo de Reservatórios de Detenção em Lote, em Logradouros e em

Grande Área da Bacia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 19 (2): 07-18, 2014. Disponível em: <https://biblat.unam.mx/hevila/RBRHRevistabrasileiraderecursoshidricos/2014/vol19/no2/1.pdf>. Acesso em: 21 fevereiro 2025.

"sistema", in **Dicionário Priberam da Língua Portuguesa** [em linha], 1996-2025, <https://dicionario.priberam.org/sistema> [consultado em 8-02-2025].

"sistema", in **Michaelis Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa** [em linha], 2015-2025, <https://dicionario.priberam.org/sistema> [consultado em 8-02-2025].

SOTHE, C.; ALMEIDA, C.; LIESENBERG, V.; SCHIMALSKI, M.. Evaluating Sentinel-2 and Landsat-8 Data to Map Sucessional Forest Stages in a Subtropical Forest in Southern Brazil. **Remote Sensing**, 9 (8): 838, 22 pp., 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9080838>

SOUZA NETO, P. F.; SILVA, D. F.; ROCHA, L. H. S.; NASCIMENTO, M. R.; PEREIRA, M. P. S. Eventos extremos de temperatura máxima no leste do Nordeste do Brasil relacionados ao ENOS. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, v. 35, p. 26–50, 2025. <https://doi.org/10.55761/abclima.v36i21.18765>.

TASSINARI, L. C. S.. **Dimensionamento de Sistemas de Drenagem Pluvial utilizando Métodos de Baixo Impacto**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso da Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 72 pp., 2014.

TUCCI, C. E. M.. Gerenciamento da Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 7 (1): 5-27, 2002.

USGS – United States Geological Survey. **Landsat 8 (L8) Data Users Handbook**. LSDS-1574, Version 5.0. Sioux Falls: USGS, 2019. <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>. Acesso em: 02 setembro 2025.

USGS - United States Geological Survey. **EarthExplorer — search and download geo-spatial data**. Reston, VA, [s.d.]. <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 02 setembro 2025.

WANDERLEY, L. S. M.. **Proposta de classificação climática da região nordeste do Brasil baseada na abordagem sinótica dos tipos de tempo**. 2020. Tese: Doutorado em Geografia – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 217 pp., 2020. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/40935>. Acesso em: 14 outubro 2025.

## APÊNDICE A - PRECIPITAÇÃO DIÁRIA MÁXIMA EM RECIFE NO ANO DE 2024

RPA	Posto	Mês											
		Janeiro 11/01/2024	Fevereiro 16/02/2024	Março 14/03/2024	Abril 04/04/2024		Junho 15/06/2024	Julho 06/07/2024	Agosto 04/08/2024	Setembro 08/09/2024	Outubro 29/10/2024	Novembro 06/11/2024	Dezembro 03/12/2024
1	P1	3,20	27,20	15,20	58,40	31,54	74,43	15,60	1,80	19,20	2,40	3,28	0,00
	P2	7,49	42,53	15,62	56,98	49,21	116,13	20,48	3,36	13,24	4,53	5,12	0,00
	P3	7,10	62,75	31,91	93,69	57,57	117,47	2,96	1,58	14,77	0,79	0,98	0,20
2	P4	14,20	60,20	28,20	60,40	31,40	133,80	14,40	7,80	20,40	1,00	1,60	3,00
	P5	11,06	46,62	14,02	62,15	43,54	130,47	19,38	3,95	13,66	3,54	3,94	0,00
	P6	23,42	59,79	30,02	45,31	38,67	118,64	19,68	5,11	26,50	1,30	2,08	3,90
3	P7	23,23	56,33	38,93	34,80	33,66	133,95	27,96	5,92	25,03	3,74	0,20	23,60
	P8	18,56	64,24	32,35	59,76	25,20	149,82	16,53	1,40	29,49	0,79	0,80	2,17
	P9	40,00	49,20	34,00	30,40	29,40	90,20	18,60	6,20	13,00	3,80	0,20	4,20
4	P10	51,00	57,40	8,60	20,89	20,20	61,97	12,78	9,40	14,40	4,60	0,00	0,80
	P11	51,71	62,11	42,92	38,37	37,11	97,56	0,82	7,14	10,66	4,80	0,25	5,30
5	P12	4,00	58,80	4,20	46,40	41,00	109,00	24,60	10,60	8,60	4,80	0,00	1,20
	P13	9,28	59,55	11,86	100,96	51,75	105,82	30,00	4,54	13,00	7,90	0,00	1,98
6	P14	2,62	31,07	2,22	24,52	21,66	65,94	22,06	5,60	7,19	4,56	0,00	2,36
	P15	10,60	55,92	3,99	54,40	35,60	90,40	18,60	16,60	11,40	7,20	0,40	3,00

Legenda: P1 = Porto | P2 = Recife - Apac | P3 = Alto do Céu | P4 = Alto Santa Teresinha | P5 = Torreão | P6 = Alto do Mandu | P7 = Dois Irmãos | P8 = Nova Descoberta | P9 = Barreiras | P10 = Brega e Chique | P11 = Várzea | P12 = Areias | P13 = San Martin | P14 = Imbiribeira | P15 = Lagoa Encantada (Cohab).

Fonte: O autor (2025). Fonte dos dados: CEMADEN (2024).