



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

BEATRIZ PEREIRA DE SOUZA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DO APROVEITAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS
COMO ESTRATÉGIA DE COMPENSAÇÃO NO SISTEMA DE DRENAGEM DA
REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE**

Recife
2025

BEATRIZ PEREIRA DE SOUZA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DO APROVEITAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS
COMO ESTRATÉGIA DE COMPENSAÇÃO NO SISTEMA DE DRENAGEM DA
REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador (a): Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Souza, Beatriz Pereira de.

Modelagem hidrológica do aproveitamento de águas pluviais como estratégia de compensação no sistema de drenagem da Região Metropolitana do Recife / Beatriz Pereira de Souza. - Recife, 2025.

113f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho.

1. Gestão de águas pluviais; 2. Drenagem urbana; 3. Barril de chuva; 4. Escoamento superficial; 5. SWMM. I. Coutinho, Artur Paiva. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

BEATRIZ PEREIRA DE SOUZA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DO APROVEITAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS
COMO ESTRATÉGIA DE COMPENSAÇÃO NO SISTEMA DE DRENAGEM DA
REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovado em: 30 / 07 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dra. Tassia dos Anjos Tenório de Melo (Examinadora Externo)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Marcus Metri Correa (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste

À memória do meu pai, José Rogério de Souza,
que, mesmo entre silêncios e desencontros,
nunca deixou de dizer com orgulho:
"tenho duas filhas doutoras".

Ainda não sou, pai,
mas hoje, com esta dissertação,
estou mais perto do que imaginei.

Neste caminho que sigo com esforço e esperança,
levo sua voz comigo,
como impulso, como bênção, como abrigo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me abençoar em cada passo da caminhada. Sua presença tem sido constante, guiando-me pelo caminho certo, colocando pessoas especiais em minha vida e agindo sempre com providência divina.

Agradeço à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio financeiro concedido, que foi essencial para a viabilização desta pesquisa. Estendo meus agradecimentos à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e a todos os professores que, com dedicação, transmitiram conhecimentos, orientações e oportunidades que contribuíram de forma significativa para minha formação acadêmica e profissional.

À minha mãe Dênia, que sempre acreditou no meu potencial e nunca mediu esforços para me oferecer o melhor.

À minha irmã Bruna, minha parceira de vida. Com ela compartilho sonhos, risos, lágrimas e conquistas. Sua presença é um porto seguro nos dias bons e ruins. Além disso, me deu o maior presente: meu sobrinho João Felipe, que chegou para transformar e ressignificar minha existência. Vocês dois são parte essencial do que sou.

Ao meu namorado Rogério Catolé, por estar sempre ao meu lado, acreditando em mim mesmo quando eu duvido, me apoiando, incentivando e sendo impulso nos meus voos.

À Camila Oliveira, pela ajuda generosa e pelo apoio constante durante a construção deste texto. Sua colaboração fez toda a diferença.

Aos meus amigos Nieldo Gonçalves, por me acolher com generosidade e exercer um papel de mentor, sempre me incentivando e contribuindo para que eu me tornasse uma pessoa e um profissional melhor; e Marcos Lourenço, por me ensinar, com a história de José do Egito, que o que somos independe do lugar onde estamos.

À minha colega de mestrado e amiga, Milena Marinho, pela parceria, apoio e incentivo constantes ao longo desta jornada.

À Bárbara Zuza, pelo suporte psicológico e emocional prestado ao longo desta caminhada. Sua escuta atenta, orientação sensível e acolhimento foram fundamentais para que eu pudesse enfrentar os desafios com mais equilíbrio, clareza e confiança.

À minha família e aos amigos, que sempre foram abrigo, amor e acolhimento. Sou imensamente grata por cada um de vocês.

RESUMO

A Região Metropolitana do Recife (RMR) enfrenta desafios históricos relacionados à gestão de águas pluviais, agravados pela urbanização acelerada e desordenada. As chuvas intensas, como as de maio de 2022, têm provocado alagamentos, deslizamentos e prejuízos socioeconômicos, evidenciando a ineficiência do sistema de drenagem urbana. Nessa conjectura, soluções sustentáveis e de baixo custo, como os reservatórios do tipo “barril de chuva”, despontam como alternativas promissoras para mitigar o escoamento superficial e aumentar a resiliência urbana frente aos eventos extremos. Este trabalho teve como objetivo principal analisar por meio de modelagem hidrológica o impacto do uso desses reservatórios como técnica compensatória no bairro de Jardim Monte Verde, bem como dimensionar esses sistemas para os municípios da RMR. A metodologia adotada envolveu a caracterização da região, coleta de dados pluviométricos, definição da demanda de água não potável e dimensionamento dos volumes de armazenamento com base nos métodos de Monte Carlo e Rippl. A modelagem foi realizada no software SWMM, considerando cinco cenários: um cenário de referência, sem a presença de reservatórios, e quatro cenários com volumes simulados de 2,5 m³, 7,5 m³, 8,5 m³ e 10 m³. Os resultados mostraram que reservatórios de 2,5 m³ foram eficazes para eventos de baixa intensidade até 25 mm, enquanto volumes entre 7,5 m³ e 10 m³ se mostraram mais adequados para chuvas intensas, com ganhos pouco significativos acima de 8,5 m³. Mesmo sob eventos extremos, os barris de chuva demonstraram capacidade de reduzir entre 9,427% e 90,287% do volume de escoamento; para a vazão de pico, a redução foi entre 0,905% e 31,362%, confirmando sua eficácia como solução viável e sustentável para o manejo das águas pluviais na RMR.

Palavras-chave: Gestão de águas pluviais; Drenagem urbana; Barril de chuva; Escoamento superficial; SWMM

ABSTRACT

The Metropolitan Region of Recife (RMR) faces historical challenges related to stormwater management, which have been exacerbated by rapid and unplanned urbanization. Intense rainfall events, such as those in May 2022, have caused flooding, landslides, and significant socioeconomic damage, highlighting the inefficiency of the current urban drainage system. In this context, sustainable and low-cost solutions, such as rain barrel systems, emerge as promising alternatives to mitigate surface runoff and enhance urban resilience to extreme weather events. This study aimed primarily to analyze, through hydrological modeling, the impact of using these reservoirs as a compensatory technique in the Jardim Monte Verde neighborhood, as well as to size these systems for the municipalities of the RMR. The adopted methodology included regional characterization, collection of rainfall data, definition of non-potable water demand, and reservoir sizing based on the Monte Carlo and Rippl methods. The modeling was performed using the SWMM software, considering five scenarios: one reference scenario without reservoirs and four scenarios with simulated storage volumes of 2.5 m³, 7.5 m³, 8.5 m³, and 10 m³. The results showed that 2.5 m³ reservoirs were effective for low-intensity rainfall events up to 25 mm, while volumes between 7.5 m³ and 10 m³ proved more suitable for intense storms, with only marginal gains above 8.5 m³. Even under extreme events, the rain barrels demonstrated the ability to reduce runoff volume by between 9.427% and 90.287%; for peak flow, the reduction ranged from 0.905% to 31.362%, confirming their effectiveness as a viable and sustainable solution for stormwater management in the RMR.

Keywords: Stormwater management; Urban drainage; Rain barrel; Surface runoff; SWMM.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS.....	11
2.1 OBJETIVO GERAL	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
3.1 PROCESSO DE URBANIZAÇÃO	12
3.2 DRENAGEM URBANA.....	14
3.3 TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS	18
3.4 RESERVATÓRIOS PARA CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA.....	26
3.5 MODELAGEM HIDROLÓGICA	32
3.6 STORM WATER MANAGEMENT MODEL - SWMM	33
3.6.1 Caracterização das sub-bacias	35
3.6.2 Precipitação	38
3.6.3 Escoamento superficial.....	39
3.6.4 Infiltração.....	42
3.6.5 Controles <i>Low Impact Development (LID)</i>.....	44
4 METODOLOGIA	48
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE	48
4.2 COLETA DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS.....	51
4.3 DEMANDA PARA USO DE ÁGUA NÃO POTÁVEL E ÁREA DE CAPTAÇÃO ..	51
4.4 DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIO	52
4.4.1 Método de Monte Carlo	53
4.4.2 Método de Rippl	53
4.5 MODELAGEM HIDROLÓGICA	54
4.5.1 Jardim Monte Verde: Estudo de caso	55
4.5.2 Caracterização das sub-bacias	56
4.5.3 Precipitação	59
4.5.4 Infiltração.....	62
4.5.5 Parâmetros do LID	63
4.5.6 Cenários de modelagem	63
4.5.7 Análise de sensibilidade	64
5. RESULTADOS.....	65
5.1 DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIO	65

5.2 MODELAGEM	67
6. CONCLUSÃO	81
6.1 LIMITAÇÕES ENCONTRADAS	82
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
REFERÊNCIAS.....	84
APÊNDICE A – Caracterização das estações pluviométricas	95
APÊNDICE B – Parâmetros utilizados para cada sub-bacia no SWMM.....	99
APÊNDICE C – Caracterização detalhada dos eventos registrados entre março e junho de 2022, incluindo informações sobre duração e intensidade.....	100
APÊNDICE D – Parâmetros dos barris de chuva utilizados no SWMM	106
APÊNDICE E – Representação Gráfica dos Eventos de Chuva Utilizados na Modelagem.....	107

1 INTRODUÇÃO

A Região Metropolitana do Recife (RMR) enfrenta, historicamente, sérios desafios relacionados à gestão das águas pluviais. Os impactos negativos das chuvas intensas, como alagamentos, deslizamentos e prejuízos socioeconômicos, têm se tornado cada vez mais frequentes e severos nas últimas décadas. Esse agravamento está diretamente associado à urbanização acelerada e desordenada que, ao modificar o ciclo hidrológico, compromete a capacidade de infiltração e de escoamento das águas.

A expansão urbana sem planejamento adequado resulta na crescente impermeabilização do solo, redução das áreas vegetadas e intervenções indevidas nos cursos d'água, agravando o risco de desastres hidrológicos e seus efeitos sobre a população. As consequências dessas transformações se manifestam em diversos níveis, com prejuízos significativos à mobilidade urbana, à saúde pública e à economia local.

Episódios recentes, como as chuvas extremas que atingiram Pernambuco no final de maio de 2022, deixaram claro o grau de vulnerabilidade da RMR, que sofreu com alagamentos generalizados, deslizamentos de massa e, tragicamente, a perda de vidas humanas. Tais eventos evidenciam o colapso de um sistema de drenagem urbana projetado para condições urbanas distintas das atuais, o qual se mostra hoje subdimensionado e ineficaz diante do volume de escoamento gerado pelas chuvas intensas.

Embora a readequação completa da infraestrutura de drenagem seja desejável, os elevados custos e a complexidade de intervenções em áreas urbanizadas tornam essa alternativa inviável no curto prazo. Nessa conjectura, as técnicas compensatórias de drenagem surgem como soluções promissoras.

Fundamentadas em princípios de sustentabilidade, essas práticas visam controlar os picos de vazão, retardar o escoamento superficial e favorecer a infiltração da água no solo, contribuindo para a mitigação de alagamentos e o aumento da resiliência urbana. A integração dessas soluções com políticas públicas mais amplas é essencial para enfrentar os desafios impostos pela expansão urbana e pelas mudanças climáticas.

Entre as alternativas disponíveis, destaca-se o uso de sistemas de captação e reaproveitamento de águas pluviais, como os reservatórios. Trata-se de uma solução

de baixo custo, fácil implementação e elevado potencial de replicação, capaz de aliviar a pressão sobre os sistemas de drenagem existentes e, ao mesmo tempo, oferecer uma fonte complementar de água para usos não potáveis. Na RMR, a adoção dessa técnica se apresenta como uma estratégia eficaz para mitigar os problemas de alagamento e, paralelamente, contribuir para a redução da escassez hídrica.

Diante desse contexto, a tragédia ocorrida no final de maio de 2022 na RMR, em especial no bairro de Jardim Monte Verde, evidenciou como eventos extremos de pluviosidade podem desencadear graves desequilíbrios em territórios marcados pela ocupação de encostas instáveis e pela precariedade habitacional. Esse cenário reforça a necessidade de soluções que reduzam a vulnerabilidade urbana e promovam maior segurança hídrica. Nesse sentido, os reservatórios apresentam-se como alternativa de baixo custo e fácil implementação, capazes de atenuar o escoamento superficial e contribuir para a resiliência das cidades diante da intensificação dos eventos extremos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o impacto do uso de reservatórios como técnica compensatória para o aproveitamento de águas pluviais e mitigação de problemas de drenagem urbana, por meio de modelagem hidrológica aplicada ao bairro de Jardim Monte Verde e do dimensionamento para os municípios da Região Metropolitana do Recife.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Dimensionar reservatórios de captação de água pluvial para residências na Região Metropolitana do Recife;
- Desenvolver cinco cenários de simulação hidrológica no SWMM, sendo um cenário referência (sem reservatórios) e quatro com diferentes volumes de reservatórios, a fim de comparar os resultados obtidos;
- Avaliar o impacto da adoção de reservatórios na redução do volume do escoamento superficial e das vazões de pico;
- Avaliar a sensibilidade dos parâmetros inseridos no SWMM, verificando sua influência nos resultados da modelagem hidrológica.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 PROCESSO DE URBANIZAÇÃO

Na década de 70, os países subdesenvolvidos vivenciaram um expressivo desenvolvimento, desencadeando um intenso processo de urbanização. No entanto, esse crescimento desordenado das áreas urbanas resultou em uma série de problemas socioambientais, como desigualdade social, favelização, assentamentos informais, poluição ambiental, impermeabilização do solo, desmatamento, inundações, deslizamentos de terra, mudanças climáticas, entre outros.

A urbanização exerce pressão sobre o meio ambiente e modifica a paisagem natural. Esse fenômeno, segundo Nagem (2008), impulsionado pela atividade humana, visando adaptar o meio físico para maior conforto pode gerar efeitos negativos que prejudicam o próprio bem-estar, perdas materiais e uma variedade de problemas sociais.

A urbanização acelerada do Brasil foi consequência da expropriação da terra, que provocou migração em massa de trabalhadores que não detinham renda ou possuíam valores insuficientes para suportar o custo da habitação nas cidades brasileiras. A solução encontrada foi ocupar regiões consideradas inadequadas, que são expostas frequentemente a situações de risco, tais como deslizamentos de terra e inundações (RIBEIRO, 2010).

Outro fenômeno da urbanização é a conurbação, que é identificada por uma expansão dos limites da cidade, incorporando áreas rurais e outras cidades periféricas. Estas últimas, anteriormente com sua própria política e administração, tornam-se parte integral da metrópole. A cidade de Recife, capital de Pernambuco, expandiu-se por meio do processo de metropolização por inchaço, da mesma maneira que a maioria das metrópoles brasileiras, que apresentam uma elevada concentração de habitantes (GONÇALVES *et al.*, 2013).

Maciel e Crespo (2021) destacam que é possível observar o fenômeno metropolitano em Recife desde os anos 50, embora em menor proporção comparado com os anos atuais. A capital iniciou como núcleo, que se expandiu para os litorais sul, norte, ao longo da BR-101 e seguindo rotas antigas. Atualmente, a urbanização se estende por vários municípios de forma contínua em grande parte da RMR, expandindo-se de maneira linear e fragmentada nas áreas mais periféricas.

No estudo de Silva *et al.* (2016), observou-se que entre 1975 e 2015 ocorreu uma consolidação notável das áreas urbanizadas do Recife, principalmente nas planícies e encostas. O crescimento de cerca de 1% na área urbanizada indica um esgotamento do espaço disponível para construção na cidade, devido às condições geográficas favoráveis, que pode ser resultado das pressões sobre a terra urbana e do aumento de seu valor, levando à expansão para outros municípios na RMR.

A configuração atual do núcleo metropolitano da RMR, caracterizado por um território de urbanização quase contínua, resulta da expansão do seu núcleo original, além da ocupação das áreas entre os eixos originais em um passado distante. Esse processo de expansão urbana é impulsionado por três principais movimentos: a expansão do núcleo central, a disseminação ao longo dos eixos conectando o centro à periferia e o desenvolvimento de núcleos secundários (MARINHO, LEITÃO e LACERDA, 2007).

A aquisição preferencial de terrenos para construção por parte dos estratos sociais com maior poder econômico promove uma desigualdade extrema no acesso ao solo. Esta desigualdade é exacerbada pela seletividade elevada na frequência e no volume dos investimentos públicos, os quais favorecem áreas de maior valor imobiliário (SOUZA, 2007).

De acordo com Marinho, Leitão e Lacerda (2007) é possível observar o processo de verticalização mais intenso em áreas consolidadas do núcleo da RMR, para acomodar o crescimento populacional das classes média e alta, sem que ocorra uma expansão significativa da cidade. Por outro lado, surgem novas formas de desenvolvimento urbano, como os condomínios horizontais fechados, que estão sendo integrados a esse mercado. Estes condomínios geralmente estão localizados nas periferias, especialmente em áreas com boa qualidade ambiental, com destaque para acessibilidade e beleza paisagística.

A supressão da vegetação é o primeiro estágio do processo de urbanização, seguido quase sempre pela impermeabilização do solo. Esse desenvolvimento urbano altera significativamente o ciclo hidrológico da região, aumentando a velocidade e o volume do escoamento superficial, adiantando e ampliando o pico das enchentes, e diminuindo a evapotranspiração vegetal e o escoamento subsuperficial. Em suma, acelera o fluxo das águas pluviais, possibilitando o acúmulo mais rápido em áreas de baixa elevação das cidades (NAGEM, 2008).

Vale ressaltar que a urbanização e a expansão urbana estão intrinsecamente ligadas aos princípios do desenvolvimento sustentável, que abrangem aspectos econômicos, sociais e ambientais. Constatase que situações adversas decorrentes da urbanização, como a construção de moradias em áreas inadequadas, representam um fator de vulnerabilidade que pode resultar em riscos e danos tanto para o meio ambiente quanto para as comunidades humanas, que são parte integrante do ecossistema (CABRAL e CANDIDO, 2019).

A urbanização em áreas ambientalmente vulneráveis, sem adequada proteção institucional, pode resultar na perda irreversível da biodiversidade do ecossistema. Portanto, o planejamento urbano deve ser cuidadosamente elaborado e adaptável às diferentes características ambientais, levando em conta suas fragilidades naturais, bem como as necessidades das populações locais (ASSIS, PIMENTEL E CASTILHO, 2013).

3.2 DRENAGEM URBANA

Com o desenvolvimento urbano acelerado e sem planejamento, observa-se uma intensa impermeabilização do solo devido à construção de telhados, ruas, calçadas, estradas, rodovias, pátios, estacionamentos, entre outros. Essas estruturas acarretam desafios no manejo das águas pluviais nas cidades, uma vez que impedem a infiltração no solo.

A ausência de planejamento urbano adequado, especialmente em relação à drenagem urbana, combinada com as modificações que o ambiente sofre em decorrência do uso inadequado do solo, são condições propícias para o surgimento de problemas nas cidades, muitas vezes complexos de resolver e que exigem intervenções estruturais dispendiosas. À medida que ocorrem mudanças no uso do solo devido à expansão e intensificação das atividades antrópicas, o ciclo hidrológico natural é alterado (MONTE e LEITE, 2008).

Cabral e Braga (2024) destacam as consequências das alterações sobre o ciclo hidrológico: redução da infiltração do solo, e consequentemente na recarga do aquífero; aumento do escoamento superficial, que podem provocar enchentes; aumento da velocidade do escoamento superficial, reduzindo o tempo de deslocamento; e redução da evapotranspiração devido a substituição da vegetação natural por áreas impermeáveis, visto que as áreas urbanas não retêm água da

mesma forma que a cobertura vegetal e não permite a evapotranspiração, como acontece com as folhas e o solo.

A urbanização nas bacias hidrográficas exerce uma intensa pressão espacial sobre sua área de abrangência, tornando-as progressivamente mais suscetíveis a alterações no uso e ocupação do solo. Isso desencadeia uma variedade de impactos sobre a população e o ambiente, incluindo eventos como alagamentos e inundações (MELO *et al.*, 2013). Além disso, há um aumento expressivo do escoamento superficial das águas por meio de estruturas, como as sarjetas das ruas, bocas de lobo, canalizações e galerias, até serem lançadas em corpos hídricos (MONTE e LEITE, 2008).

As cheias urbanas discutidas neste contexto referem-se a qualquer acúmulo de água em ruas e avenidas de áreas habitadas, que afete pedestres e moradores, causando transtornos e prejuízos. Esse fenômeno pode ser provocado tanto por chuvas intensas quanto por sistemas de drenagem ineficientes. Portanto, o termo será utilizado como sinônimo de enchentes ou inundações (NAGEM, 2008).

Os sistemas de drenagem urbana desempenham um papel crucial na prevenção de inundações, especialmente em regiões mais baixas das comunidades que estão propensas a alagamentos ou localizadas nas margens de corpos d'água naturais (ANDRADE FILHO, SZÉLIGA e ENOMOTO, 2000). Vale ressaltar que para a gestão da drenagem urbana é necessário definir o controle dos impactos e os modelos de gestão e financiamento.

Para Tucci (2012), o controle dos impactos é formado por medidas legais para controlar os impactos atuais e futuros na drenagem urbana, o que implica restrições para as novas construções e reformas, ao mesmo tempo em que oferece estímulos para as estruturas já existentes. Enquanto os modelos de gestão e financiamento são mecanismos de sustentabilidade financeira para o gerenciamento dos serviços e viabilização do funcionamento do sistema de gestão.

O panorama brasileiro da drenagem e gestão de águas pluviais urbanas é complexo, apresentando uma variedade de desafios que demandam soluções para a criação de um ambiente urbano integrado e sustentável, capaz de promover saúde e bem-estar social. Além das limitações nos serviços e na estrutura institucional, há impactos difundidos devido à falta e deficiência na prestação e gestão desses serviços, bem como à dificuldade em definir os serviços a serem oferecidos e,

consequentemente, estabelecer parâmetros e métricas para sua universalização (SILVA *et al.*, 2024).

Um aspecto preocupante nos sistemas de drenagem é a presença de uma grande quantidade de resíduos, em grande parte devido à falta de conscientização ambiental da população. Isso resulta na obstrução do sistema, agravando ainda mais os problemas de alagamento. É imprescindível realizar a manutenção e expansão do sistema de drenagem existente, além de incorporar elementos que favoreçam a absorção das águas pluviais, como a utilização de pedras de paralelepípedos e a expansão de áreas permeáveis, incluindo o emprego de pavimentos permeáveis. Essas intervenções são propostas mais ecológicas, de longa duração e sustentáveis (FORMENTINI, MONTEIRO e SOTERO, 2024).

O crescimento populacional e a intensa urbanização podem interagir com as mudanças climáticas, aumentando a frequência e a intensidade de fenômenos climáticos extremos, como chuvas torrenciais e tempestades, acarretando mais pressão nos sistemas de drenagem urbana. Consoante Tsuji *et al.* (2023), esse aumento da frequência de eventos climáticos extremos em decorrência das mudanças climáticas tem agravado os desafios e incidentes relacionados à drenagem urbana, especialmente em regiões de clima tropical e em áreas onde a urbanização ainda segue um modelo higienista. Para enfrentar tais questões, é fundamental contar com planejamentos cuidadosos e sua efetiva implementação.

Na drenagem urbana, o conceito de risco está ligado à frequência com que ocorre um evento de chuva em termos de potencial para causar enchentes. Esse risco é determinado pela probabilidade de que tal evento ocorra em um determinado ano, e o tempo de recorrência é o inverso dessa probabilidade, indicando o intervalo médio em que o evento pode se repetir. Essas estimativas são obtidas por meio de análises estatísticas de dados históricos que permitem compreender as características de inundação de uma determinada área (NAGEM, 2008).

Torna-se cada vez mais evidente que os eventos de chuvas extremas, relacionados às variabilidades climáticas e possivelmente às mudanças climáticas, causam sérios danos às comunidades, especialmente nos grandes centros urbanos como em Recife. A frequência dessas chuvas intensas gera alerta sobre o aumento de fatalidades, especialmente devido ao crescente número de pessoas que vivem em áreas de risco desprovidas de estruturas capazes de resistir a eventos climáticos extremos (SOUZA e AZEVEDO, 2012).

Souza (2011) afirma que as variabilidades climáticas exercem uma influência significativa nas atividades humanas, variando em termos de temperatura, precipitação e ocorrência de eventos extremos, como secas e chuvas intensas. Essas variações impactam a agricultura, os recursos hídricos, a saúde e o meio ambiente em níveis local e regional. Uma análise cuidadosa dos registros climáticos de longo prazo é essencial para as sociedades contemporâneas, fornecendo uma base para compreender as tendências climáticas e suas possíveis causas, uma vez que os impactos das flutuações climáticas na sociedade estão especialmente ligados aos eventos extremos de precipitação.

O estado de Pernambuco enfrenta regularmente desafios antagônicos: durante o período chuvoso, a RMR e a Zona da Mata sofrem com escorregamentos de encostas, inundações e alagamentos. Enquanto isso, no Sertão e no Agreste, são comuns longos períodos de seca, resultando em significativas perdas econômicas e sociais (SOUZA *et al.*, 2014).

As precipitações intensas e/ou duradouras têm o potencial de resultar em alagamentos temporários de pequena escala, ocasionar a interrupção dos serviços de infraestrutura ou, em casos extremos, provocar fatalidades devido a acidentes ou à propagação de doenças de veiculação hídrica (NAGEM, 2008; SOUZA, 2011).

Souza e Azevedo (2012) esclarecem que as precipitações intensas são uma constante da natureza e continuarão sendo. Além disso, a responsabilidade dos impactos sociais, econômicos e ambientais não é exclusivamente das chuvas, e sim da carência de recursos, infraestrutura, educação e política que são os responsáveis pelas consequências dos desastres.

Os desastres relacionados às chuvas são frequentes em Recife, especialmente devido à inadequação da infraestrutura urbana, além das condições sociais e econômicas desfavorecidas da população mais vulnerável. Esses problemas são agravados pela falta de consciência e educação ambiental da sociedade. Além disso, é importante destacar que cerca de um terço da população reside em áreas de risco, localizadas nas margens dos rios e em regiões com infraestrutura precária, refletindo uma longa história de exclusão social que permeia a trajetória do país (SOUZA, 2011).

Nagem (2008) explica que a ocupação de áreas potencialmente alagáveis, a proliferação de favelas, a invasão de margens, o descarte irregular de resíduos sólidos e a construção inadequadas de aterros, pontes e travessias, são fatores que intensificam as inundações. Além disso, a destruição da cobertura vegetal nas

encostas acelera os processos erosivos, contribuindo para o assoreamento dos cursos d'água. Isso reduz a capacidade das seções fluviais, provocando o extravasamento das águas em vazões que anteriormente eram contidas dentro dos leitos dos rios.

Anualmente em Recife, durante o período de chuvas, os residentes das áreas vulneráveis enfrentam acidentes como deslizamentos de terra e inundações devido à precariedade de seus assentamentos e à exposição aos riscos associados aos eventos pluviais. Para essas famílias que habitam essas zonas, as chuvas são sinônimo de angústia e temor. É fundamental sensibilizar e fornecer informações sobre os riscos de desastres às autoridades governamentais, políticas e empresariais, e isso só pode ser alcançado com a participação ativa dos formadores de opinião (SOUZA, 2011).

Segundo Melo *et al.* (2013), o manejo das águas pluviais urbanas visa melhorar a qualidade de vida por meio de um planejamento integrado e sustentável que harmonize as necessidades humanas com a preservação do meio ambiente. Nesse contexto, novas alternativas estão sendo desenvolvidas para aprimorar e complementar o sistema de drenagem urbana existente.

A infraestrutura verde e a drenagem sustentável, também conhecidos como técnicas compensatórias desempenham um papel fundamental no planejamento urbano ao reduzir o escoamento superficial, recarregar os lençóis freáticos e mitigar alagamentos. Essas soluções baseadas na natureza melhoram a qualidade da água e aumentam a resiliência urbana aos desafios climáticos e às enchentes.

3.3 TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS

É do conhecimento público que problemas relacionados ao escoamento da água da chuva em eventos pluviométricos extremos afetam principalmente a população de menor renda e residente em áreas mais vulneráveis. Dessarte, é fundamental para toda a sociedade a busca por técnicas que sejam capazes de mitigar os impactos, principalmente para os moradores de áreas de risco, que enfrentam as consequências de maneira ainda mais severa (SALGUEIRO *et al.*, 2021).

As abordagens tradicionais para a drenagem de águas pluviais em áreas urbanas, como a construção de galerias subterrâneas e a retificação e revestimento de rios, visam canalizar rapidamente o escoamento para fora das zonas urbanas. No

entanto, a rápida urbanização global revelou as limitações dessas soluções, que apenas transferem as cheias para áreas a jusante, sem resolver o problema das inundações de forma sustentável. Além disso, os altos custos dessas infraestruturas são frequentemente impraticáveis para municípios com recursos financeiros limitados, e o escoamento rápido pode levar à poluição dos rios (SILVA, 2006).

Segundo o mesmo autor, com o aumento da impermeabilização do solo urbano, essas soluções se mostram incapazes de manejá-las vazões crescentes, resultando em inundações frequentes em pontos críticos. Em contraste, soluções alternativas buscam mitigar os impactos da urbanização no escoamento superficial, restaurando as condições pré-urbanização e são conhecidas como soluções compensatórias devido a essa abordagem.

Diante da necessidade de reformular a abordagem das obras de drenagem pluvial, emergiu o conceito de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID, em inglês *Low Impact Development*). Esse conceito fundamenta-se na gestão das águas pluviais próxima à sua origem, empregando técnicas que visam replicar funções naturais frequentemente comprometidas pela urbanização (TASSI *et al.*, 2014).

As técnicas compensatórias de drenagem são tecnologias de baixa complexidade construtiva e impacto ambiental reduzido, projetadas para otimizar a infiltração e retenção das águas pluviais. Essas técnicas visam diminuir o escoamento superficial direto e reduzir os investimentos elevados em sistemas hidráulicos tradicionais. Elas envolvem soluções integradas que promovem a infiltração das águas pluviais e aumentam o tempo de armazenamento, o que contribui para a redução da vazão de pico e dos escoamentos superficiais (OLIVEIRA, BARBASSA e GONÇALVES, 2016).

As técnicas compensatórias são empregadas para transformar superfícies impermeáveis e reestabelecer o ciclo hidrológico que existia antes do processo de urbanização (GARRIDO NETO, 2012). São classificadas de acordo com sua localização em relação à área a ser drenada, classificando-se em três tipos principais: controle na fonte; controle nos sistemas viários e controle a jusante.

As técnicas para controle na fonte são implementadas em parcelas individuais ou pequenos conjuntos de parcelas, focando a drenagem de áreas reduzidas. As técnicas para controle nos sistemas viários são integradas aos sistemas de infraestrutura viária existentes, enquanto as técnicas para controle a jusante são

aplicadas em áreas maiores, associadas à drenagem de grandes conjuntos de parcelas (ReCESA, 2007).

No que se refere ao controle na fonte, destacam-se os telhados verdes, também conhecidos como "ecoroofs", os micro-reservatórios, os poços de infiltração e os sistemas de biorretenção, tais como biovaletas e os jardins de chuva. No que concerne ao controle linear, ressaltam-se as trincheiras de infiltração, valas de detenção, valas de infiltração, pavimentos permeáveis e áreas úmidas lineares ou parques lineares (FONSECA, 2023).

A NBR 16416 (ABNT, 2015) define pavimento permeável como pavimento que atende simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento e cuja estrutura permite a percolação e/ou o acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar dano à sua estrutura.

Almeida (2017) destaca que, para assegurar a eficácia da implantação de pavimentos permeáveis, é fundamental considerar as características hidrológicas do local de instalação, uma vez que a espessura e a durabilidade do pavimento devem ser compatíveis com a intensidade pluviométrica da região. Essa técnica apresenta elevada porosidade e permeabilidade, atributos que podem influenciar significativamente a hidrologia local e gerar impactos ambientais positivos (VIRGILIIS, 2009). Tais características decorrem diretamente dos materiais que compõem os pavimentos.

Esses dispositivos podem ser executados com as seguintes tipologias de revestimentos permeáveis: pavimento com revestimento constituído por peças de concreto com juntas alargadas; peças de concreto com áreas vazadas; peças de concreto permeável; placas de concreto permeável; pavimento revestido com concreto permeável moldado no local (ABNT, 2015).

Além da redução do escoamento superficial, os pavimentos porosos mitigam outros impactos causados pela pavimentação convencional. Os blocos de concreto vazados, quando preenchidos com grama, aumentam a área verde, melhoram as condições de evapotranspiração e diminuem as ilhas de calor. Por sua vez, o concreto poroso, utilizado no sistema viário, reduz o risco de aquaplanagem, melhora a visibilidade, diminui as distâncias de frenagem sob chuva e reduz o ruído do tráfego devido ao atrito dos pneus com o pavimento (DIAS e ANTUNES, 2010).

Uma das vantagens desse dispositivo é a facilidade de acesso e implantação tanto em espaços públicos quanto privados. Pode ser instalado em calçadas de vias

públicas ou privadas, bem como em estacionamentos de garagens e outros ambientes (ALENCAR *et al.*, 2022).

Acioli (2005) considera o pavimento permeável uma técnica eficiente e econômica, caracterizada pela multifuncionalidade, apresentando boa integração com o espaço urbano. Os custos adicionais de construção e manutenção, quando comparados aos pavimentos convencionais, são geralmente neutralizados pela redução dos custos de implantação de um sistema de drenagem, uma vez que as vazões geradas são inferiores às de um pavimento convencional (DIAS e ANTUNES, 2010).

Garrido Neto (2012) identifica duas principais desvantagens desta técnica: a necessidade de um controle rigoroso durante a construção e manutenção para evitar entupimentos e obstruções, e a inadequação para locais com tráfego intenso ou movimentação de cargas pesadas.

A ausência de manutenção dos pavimentos acarreta a redução da capacidade de infiltração. Para prevenir a impermeabilização, a manutenção dos pavimentos permeáveis envolve a varrição regular, aproximadamente duas vezes por ano, a fim de prolongar a vida útil do pavimento (JABUR *et al.*, 2015).

A aplicação de pavimentos permeáveis ainda carece de dados concretos sobre seu desempenho mecânico. Para a popularização dessa tecnologia no meio técnico, é fundamental que pesquisas abordem aspectos de durabilidade do dispositivo, conciliando os fatores mecânicos da camada de revestimento e os geotécnicos da camada de base, além dos critérios hidráulicos e hidrológicos já bem estabelecidos (COUTINHO, 2011).

Os jardins de chuva são descritos como estruturas hidrológicas funcionais na paisagem, caracterizadas por baixo investimento e manutenção simplificada. Através do sistema solo-planta-atmosfera e dos processos de infiltração, retenção e adsorção, esses jardins purificam e absorvem as águas pluviais de pequenas áreas, reduzindo o volume escoado e protegendo as águas subterrâneas (LI e ZHAO, 2008).

A proposta desses sistemas consiste em compensar as áreas impermeáveis inevitáveis no cenário atual, através de espaços rebaixados constituídos de vegetação e solo poroso (BASTOS, 2021). Melo (2011) explica que, apesar dessa técnica compensatória ser amplamente difundida em alguns países desenvolvidos, esse sistema de biorretenção é relativamente novo e enfrenta diversos desafios em sua

aplicabilidade, especialmente em áreas onde a abordagem predominante de gestão de escoamento ainda se baseia em sistemas tradicionais de drenagem urbana.

O dimensionamento desse dispositivo é baseado nos dados pluviométricos regionais, com o objetivo de adequar sua capacidade às condições locais. Em áreas com altos índices de precipitação, a estrutura pode ser sobrecarregada, comprometendo seu funcionamento e potencialmente causando danos ao sistema (OLIVEIRA *et al.*, 2020).

O jardim de chuva é uma técnica de controle na fonte, instalada em áreas escavadas e preenchidas com materiais granulares de alta permeabilidade e material orgânico, otimizando as principais funções do sistema: retenção, filtração e infiltração (MELO *et al.*, 2014).

O objetivo dessa estrutura é minimizar os picos de vazão e fluxo gerados pelo escoamento superficial, minimizando a produção do volume na fonte; melhorar o conforto urbano e ambiental, amenizando as temperaturas de ambientes internos e ilhas de calor; e recuperar os processos do ciclo hidrológico, reduzidos pelo aumento das superfícies impermeáveis (MELO, 2011).

Oliveira *et al.* (2020) destacam que o investimento neste tipo de construção é elevado pela falta de incentivos e de estímulo à consciência ambiental. Todavia, a prevenção de desperdícios nos canteiros de obra, a redução na produção de resíduos sólidos e a diminuição dos custos de manutenção e consumo asseguram a rentabilidade, permitindo o retorno do investimento em iniciativas sustentáveis. Assim, este tipo de obra se torna viável, proporcionando um retorno a longo prazo.

Essa técnica representa uma solução promissora para o desenvolvimento de cidades hidrologicamente sustentáveis, mitigando os impactos negativos de um processo de urbanização não planejado e contribuindo para a recuperação de ecossistemas urbanos. Embora essa solução seja técnica e economicamente viável, é importante destacar que os custos iniciais são elevados (SILVA, TEIXEIRA e SANTOS, 2020).

Telhado verde é definido, de acordo com a Lei Ordinária nº 18.112/2015 de Recife, como camada de vegetação aplicada sobre a cobertura das edificações, da área de estacionamento, e piso de área de lazer, de modo a melhorar o aspecto paisagístico, diminuir a ilha de calor, absorver parte do escoamento superficial e melhorar o microclima local.

Conhecido também como cobertura verde, telhado vivo ou jardim suspenso, o telhado verde é uma técnica construtiva que consiste em uma cobertura vegetal para habitações, edifícios ou estruturas de apoio, executada com gramíneas ou outras plantas, que pode ser instalado em lajes impermeabilizadas ou sobre telhados convencionais (SILVA e DUARTE, 2017). Essa técnica proporciona conforto térmico e acústico nos ambientes internos. Tem por função principal aumentar as áreas verdes, diminuindo as ilhas de calor, oportunizando, assim, a melhoria da qualidade do meio ambiente (RANGEL, ARANHA e SILVA, 2015).

Ferreira e Moruzzi (2007) mencionam que o telhado verde foi inicialmente concebido com um propósito estético. O Jardim Suspenso da Babilônia, considerado o registro mais antigo de vegetação sobre edificações, exemplifica essa prática histórica.

Esse modelo é um exemplo recorrente de ecoinovação e sustentabilidade. Desta maneira, é primordial destacar também sua função técnica compensatória drenante no sistema de microclima no qual ele está inserido. A tipologia dos telhados verdes inclui camadas de solo, mantas permeáveis e impermeáveis, que facilitam a drenagem da água, reduzindo e retardando o volume de escoamento das águas pluviais. Podem ser de dois tipos: o intensivo e o extensivo (ALENCAR *et al.*, 2022).

Em Recife, a Lei Ordinária nº 18.112/2015 tornou obrigatório o uso de telhados verdes em projetos de edificações habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos e não-habitacionais com mais de 400 m² de área coberta para aprovação. Além disso, a lei determina que lotes com área superior a 500 m², edificados ou não, e com área impermeabilizada superior a 25% da área total do lote, devem incluir reservatórios de águas pluviais como condição para aprovação de projetos iniciais.

Nunes, Fonseca e Silva (2017) apresentam os múltiplos benefícios no contexto urbano da utilização dos telhados verdes, servindo como elementos paisagísticos que aumentam a sensação de bem-estar devido à proximidade com a vegetação. Eles contribuem significativamente para a absorção de CO₂, ajudando a mitigar os efeitos das ilhas de calor e do efeito estufa. Além disso, melhoraram o conforto ambiental interno das edificações, reduzindo o consumo de energia para climatização e proporcionando controle da poluição sonora.

Em relação as vantagens dos telhados verdes abrangem desde a melhoria das condições termoacústicas até os fatores psicológicos que influenciam o bem-estar das pessoas. Esses benefícios incluem aspectos estéticos, terapêuticos, de lazer, sociais,

econômicos e ambientais (RANGEL, ARANHA e SILVA, 2015). Por outro lado, apesar de apresentar um alto custo de instalação em relação ao telhado convencional, esse investimento inicial é recuperado em curto prazo com a economia resultante da redução do consumo de energia ao longo do uso da edificação (ROLA, 2008).

Os poços de infiltração apresentam grande potencial para reduzir o volume de escoamento superficial e tratar a água infiltrada (REIS, OLIVEIRA e SALES, 2008). São estruturas que utilizam materiais e métodos construtivos que permitem a recarga dos lençóis freáticos (REIS, 2018).

O dimensionamento dos poços depende de parâmetros hidrológicos, como a intensidade, duração e frequência da chuva, tempo de funcionamento e esvaziamento do sistema, além de dados específicos do solo local, como a taxa de infiltração ou permeabilidade (SIVIERO, 2018).

Durante precipitações prolongadas, quando a região ao redor do poço fica saturada, a capacidade do poço é atingida e transforma-se em um reservatório de retenção. Se o poço atingir sua capacidade máxima de operação, a água excedente é direcionada por um extravasor para o sistema convencional de captação de água pluvial. Esse sistema pode reter e infiltrar 100% da água de uma determinada chuva de projeto, desde que haja disponibilidade de área e condições adequadas de parâmetros locais, como nível do lençol freático, capacidade de infiltração do solo e capacidade estrutural do solo (REIS e ILHA, 2014).

A integração dessa técnica aos sistemas tradicionais pode representar uma alternativa promissora para novos cenários urbanos. Prevê-se um significativo ganho econômico com o redimensionamento das redes, resultando na redução dos diâmetros das tubulações principais e das dimensões dos poços de visita. Além disso, em áreas que demandam soluções específicas para picos de vazão e possíveis eventos de cheias, a técnica pode ser implementada individualmente, garantindo a coleta, detenção e infiltração do escoamento superficial excedente, integrando-se facilmente à paisagem urbana (SIVIERO, 2018).

O uso de poços de infiltração revela-se como uma ferramenta viável no combate ou atenuação das enchentes urbanas, para isso, é necessário que esse dispositivo seja utilizado em larga escala (VIEIRA *et al.*, 2020). Ademais, é uma técnica funcional devido à sua estrutura pontual e vertical, que se integra bem ao contexto urbano, ocupando pouco espaço e podendo ser instalados em locais fechados, como subsolos de prédios. No entanto, é fundamental tomar cuidados com a poluição do

solo e a colmatação, que são as principais causas de inutilização desses dispositivos (SPONCHIADO, 2021).

A trincheira de infiltração é uma técnica compensatória que reduz vazões, trata o escoamento superficial e promove a recarga das águas subterrâneas (CAPUTO et al., 2013). Constituem-se em valas longas e estreitas, preenchidas com material granular e revestidas com geotêxtil. Essa técnica é destinada a reter a água precipitada por tempo suficiente para que a infiltração ocorra gradualmente (REIS, 2018).

A implementação necessita de análises prévias sobre os aspectos urbanos de uso e ocupação, de infraestrutura existente, topográficos, hidrogeológicos, entre outros. Essas informações sobre a realidade do local de implantação são obtidas na fase de planejamento do sistema (MELO et al., 2016).

As trincheiras de infiltração funcionam como reservatórios convencionais para amortecimento de cheias. Ao atingir a capacidade máxima de saturação do solo da região de contorno, a água acumulada no sistema de infiltração percola lentamente através do reservatório de brita, até alcançar o ponto de extravasamento. Nesse estágio, a água é integrada ao sistema convencional de drenagem urbana (REIS, 2018).

Considerando os benefícios proporcionados pela implementação de trincheiras, como o amortecimento e a redução dos volumes de escoamento superficial, e as limitações impostas pelos espaços urbanizados para a aplicação dessa técnica, é crucial realizar estudos comparativos entre as diversas técnicas de drenagem alternativa disponíveis. Esses estudos devem avaliar as possibilidades de integração dessas técnicas com os sistemas convencionais existentes, identificando as soluções que melhor se adaptem aos ambientes urbanos (DARONCO e MINUZZI, 2018).

Os autores reforçam que o custo ainda não está bem definido devido à limitada aplicação da técnica, especialmente no Brasil. Embora esse sistema tenha um custo inicial elevado, é crucial considerar os benefícios que sua implantação oferece na redução de enchentes e inundações, o que, por sua vez, diminui os prejuízos materiais e financeiros da população.

Para o planejamento e implantação dessas técnicas descritas, diversos aspectos devem ser considerados. Do ponto de vista físico, são fundamentais a topografia do local, a capacidade de infiltração do solo, a estabilidade do subsolo, o

nível das águas subterrâneas e o aporte permanente de água. Aspectos urbanísticos e de infraestrutura incluem a disponibilidade de espaço, a inclinação e forma dos telhados e as redes existentes.

No que tange aos aspectos sanitários e ambientais, devem ser avaliados os riscos de poluição, a presença de finos na água e os riscos sanitários relacionados à proliferação de doenças. Por fim, no âmbito socioeconômico, é importante considerar a percepção da população local sobre a estrutura a ser implantada, bem como os critérios relacionados à manutenção e aos custos envolvidos (ReCESA, 2007).

De acordo com Reis (2018), a escolha da técnica mais adequada para uma localidade é condicionada por variáveis como área de contribuição, vazão de escoamento superficial, capacidade de infiltração do solo, nível do lençol freático, estabilidade do solo, índice pluviométrico local, intensidade, duração e frequência das chuvas, e formas de uso e ocupação do solo na região onde será implantada. Por serem sistemas pontuais, a compreensão desses parâmetros é crucial para garantir a eficácia e a adaptação da técnica escolhida ao contexto específico.

Atualmente, diversos projetos de lei em cidades brasileiras têm exigido a retenção das águas pluviais com o objetivo de mitigar os picos de vazão de enchentes. Essa medida assegura que o volume de água armazenado seja direcionado para as galerias pluviais apenas após a passagem do pico de escoamento superficial. Embora as características qualitativas e as estratégias de armazenamento variem, dependendo se o foco é a contenção de picos de vazão para drenagem urbana ou o reaproveitamento para usos não potáveis, o volume de água de chuva retido torna-se disponível e apto para aproveitamento (FERREIRA e MORUZZI, 2007).

3.4 RESERVATÓRIOS PARA CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA

Os Sistemas de Captação de Água de Chuva têm origem em períodos antigos, refletindo a preocupação humana em preservar esse recurso natural essencial: a água. Tais práticas são especialmente comuns em regiões onde o acesso à água é limitado, como ocorre no Nordeste do Brasil (GARRIDO NETO, 2012).

A escassez de água no semiárido do Nordeste brasileiro destaca a relevância da adoção do sistema para ampliar a oferta hídrica, dadas as condições climáticas adversas. A disponibilidade e o uso de recursos hídricos continuam sendo um desafio

central para o desenvolvimento da região. Diariamente, grandes esforços são feitos para mitigar os graves efeitos da falta de água e assegurar o fornecimento adequado para o consumo humano e animal, além de garantir a irrigação (FONSECA, 2016).

A implementação de sistemas de aproveitamento de água da chuva visa diminuir o consumo de água potável em atividades menos nobres, tais como: lavagem de calçadas, veículos, rega de jardins e uso em bacias sanitárias (CABRAL, KEMPKA e KURITZA, 2019). No entanto, é necessário avaliar oferta x demanda para melhor utilização dessa alternativa.

O aproveitamento da água da chuva como fonte alternativa para usos não potáveis tem sido amplamente adotado em países desenvolvidos e em desenvolvimento, tanto como recurso principal quanto suplementar, contribuindo de maneira significativa para a gestão sustentável dos recursos hídricos (ASSUNÇÃO et al., 2015). A viabilidade do uso da água pluvial se revela positiva, considerando que reduz a demanda por água proveniente das companhias de saneamento, resultando em economia nos custos com água potável e diminuindo o risco de enchentes (MAY, 2004).

Fendrich (2002) afirma que um sistema de captação, armazenamento, aproveitamento e infiltração de águas pluviais desempenha um papel fundamental no controle do balanço hídrico. Ele atua como uma medida corretiva e mitigadora dos impactos provocados pelas atividades humanas no ciclo hidrológico local, com o objetivo de reduzir o escoamento superficial durante chuvas intensas. Dessa forma, contribui para a diminuição dos picos de enchentes em áreas urbanas, assim como nas encostas, córregos e canais dos vales que recebem essas águas.

O reservatório de armazenamento constitui um componente essencial dos sistemas de aproveitamento de água da chuva. Seu dimensionamento está diretamente relacionado às características da captação, aos índices pluviométricos da região e às demandas de consumo. No entanto, ao considerar que o reservatório deve permanecer abastecido na maior parte do tempo, especialmente para suprir as necessidades durante os períodos de seca, o tamanho ideal do tanque pode se tornar excessivamente grande, tornando o investimento inviável para a maioria da população (CARVALHO, OLIVEIRA e MORUZZI, 2007).

A NBR 15527 não especifica métodos de dimensionamento para reservatórios de água de chuva, ficando a decisão a cargo do projetista, desde que sejam considerados aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Esta norma abrange

aspectos como a concepção do sistema de aproveitamento de água de chuva, calhas, condutores, pré-tratamento, reservatórios, instalações prediais, qualidade da água, tratamento e manutenção (ABNT, 2019)

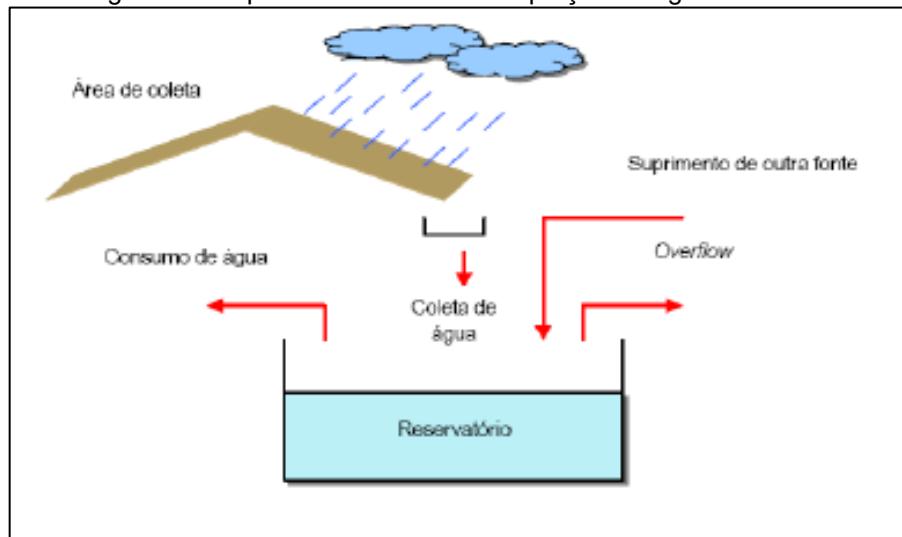
A variabilidade dos métodos de dimensionamento gera incertezas para o projetista sobre o risco de falha no abastecimento e o volume de água desperdiçada. A escolha da técnica é influenciada pela facilidade de cálculo, sendo que métodos que utilizam séries históricas de dados pluviométricos tendem a oferecer resultados mais precisos, pois consideram as características locais. No entanto, esses dados frequentemente demandam processamento complexo, dificultando sua aplicação direta (DORNELLES, TASSI e GOLDENFUM, 2010).

Bezerra *et al.* (2010) instruem que a deliberação do método mais apropriado deve ser fundamentada na comparação dos volumes calculados, na viabilidade em relação à área disponível para a construção do reservatório e nos custos associados, que podem representar uma parte significativa do investimento total do sistema. Além disso, é essencial que a qualidade da água da chuva coletada atenda às demandas necessárias, assegurando a segurança sanitária dos usuários.

O objetivo do dimensionamento adequado é determinar uma capacidade volumétrica que atenda à maior demanda possível, minimizando os custos de construção. Tendo em vista que reservatórios excessivamente grandes podem se tornar inviáveis tanto do ponto de vista físico quanto econômico, pois o espaço disponível pode ser limitado e o custo elevado, podendo tornar o projeto financeiramente proibitivo ou tecnicamente impraticável (CARVALHO, OLIVEIRA e MORUZZI, 2007; REZENDE e TECEDOR, 2017).

O sistema de captação de água de chuva apresenta um funcionamento simples, baseado em três componentes principais: a área de captação (geralmente o telhado), os dispositivos de condução (como calhas e tubulações) e o reservatório para armazenamento. Além desses elementos básicos, o sistema pode incluir dispositivos complementares, como filtros, para melhorar a qualidade da água coletada. Todos esses componentes são organizados de forma a garantir uma captação eficiente, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Esquema do sistema de captação de água de chuva.



Fonte: Tomaz (2010).

Um dos principais desafios do aproveitamento da água da chuva está relacionado ao clima, especialmente à distribuição e ao volume das precipitações ao longo do ano, que impactam diretamente a capacidade dos reservatórios. A estimativa do volume desses reservatórios é incerta, pois depende da disponibilidade e confiabilidade dos dados de precipitação e consumo (MARINOSKI, GHISI e GÓMEZ, 2004).

Para Jesus e Silva (2017), a confiabilidade é garantida a partir de uma análise detalhada da série histórica de precipitação da região. Por meio da probabilidade estatística, é possível estimar a frequência de determinados eventos de chuva, permitindo que o sistema seja dimensionado de forma a atender às demandas esperadas e minimizar o risco de falhas.

De acordo com Rezende e Tecedor (2017), o reservatório de um sistema de aproveitamento de água de chuva deve ser projetado para evitar períodos prolongados de inatividade e garantir que não haja desperdício de água pluvial, de forma a atender de maneira eficiente as demandas da edificação. Para isso, a estimativa da demanda de consumo de água pluvial é realizada com base no consumo mensal destinado aos usos secundários, como apontam Gomes *et al.* (2023).

Para garantir a qualidade adequada da água coletada, é essencial o descarte automático da primeira chuva, que remove detritos e impurezas. A avaliação do volume de água a ser descartado é uma das etapas mais importantes nesse processo,

sendo fundamental para assegurar que a água filtrada atenda aos padrões de qualidade para os usos desejados (ROCHA, REIS e ARAÚJO, 2011).

A captação da água de chuva realiza-se em superfícies impermeabilizadas, como telhados, lajes, pátios e estacionamentos. Entre essas, os telhados são considerados as melhores superfícies para coleta, pois produzem água de maior qualidade. A área de captação é um elemento crucial no dimensionamento, visto que determina o volume de água que pode ser captado. Essa área inclui superfícies inclinadas ou planas, feitas de materiais com baixa absorção de água, como telhas de Policloreto de vinilo (PVC), zinco, ferro galvanizado, fibrocimento, cerâmica ou concreto armado (MAY, 2004).

O dispositivo de descarte inicial desempenha um papel crucial no sistema de captação de água de chuva, pois é responsável por armazenar os volumes iniciais da precipitação, que contêm impurezas provenientes da atmosfera e das superfícies de captação. Assim, impede que essas impurezas sejam direcionadas ao reservatório, garantindo que apenas a água de melhor qualidade seja armazenada para uso (FONSECA, 2016).

Em períodos de maior frequência de precipitação ou em dias consecutivos de chuva, observa-se uma redução significativa na concentração de sólidos na água pluvial. Nessas condições, o tempo necessário para o descarte da água de limpeza do telhado pode ser reduzido (MAY, 2004).

Para o tratamento e aprimoramento da água de chuva destinada ao consumo, é essencial a adoção de técnicas adequadas de filtragem. Uma das soluções é a instalação de grelhas hemisféricas ou filtros separadores de impurezas no tubo de queda, que removem folhas, detritos e impedem o acesso de pequenos animais à cisterna (JESUS e SILVA, 2017).

Dependendo das condições específicas do local, o reservatório pode ser projetado para atender diferentes demandas, que variam desde a cobertura das necessidades diárias até a satisfação da demanda por períodos de até um ano (MAY, 2004).

A adoção do aproveitamento de água de chuva em áreas urbanas, conforme apontado por Maebara e Barreto (2017), pode suprir até 30% da demanda por água potável, gerando significativos benefícios econômicos ao reduzir a necessidade de produção e aliviar a pressão sobre os sistemas de abastecimento. Além dos ganhos econômicos, essa prática contribui para a preservação dos mananciais e fomenta a

conscientização da população sobre a viabilidade do uso da água de chuva como alternativa sustentável.

Outros usos podem ser considerados, desde que atendam aos requisitos de qualidade e segurança sanitária adequados para cada finalidade. Em algumas regiões, especialmente onde há escassez de recursos hídricos, a água de chuva pode ser utilizada para consumo potável, desde que sejam adotadas as devidas precauções de tratamento (BEZERRA *et al.*, 2010).

Um aspecto relevante diz respeito aos períodos prolongados de estiagem, que resultam no aumento de parâmetros como turbidez, cor aparente, condutividade, sólidos dissolvidos e alcalinidade na água de chuva escoada sobre telhados. Esse fenômeno é atribuído ao acúmulo de matéria orgânica e outros poluentes nas superfícies das coberturas durante a seca, sendo posteriormente transportados pela precipitação (ROCHA, REIS e ARAÚJO, 2011).

A integração de coberturas verdes e reservatórios requer atenção a alguns fatores importantes. As coberturas verdes reduzem o volume de água captada, diminuindo os custos com reservatórios, mas também a quantidade de água disponível (GARRIDO NETO, 2012). Por outro lado, Barcaro *et al.* (2021) demonstram que os telhados verdes aumentam a capacidade de retenção da chuva, potencializando o aproveitamento pluvial.

May (2004) recomenda alguns cuidados específicos na instalação e manutenção dos sistemas: prevenção da proliferação de microrganismos; segurança do sistema; manutenção regular; design do reservatório; reabastecimento; evitar contaminação cruzada; filtração e cloração; e sinalização adequada.

Tomaz (2010) caracteriza dois tipos de captação: para evitar enchentes, o reservatório deve permanecer vazio; já para aproveitamento, deve manter água armazenada para atender às demandas.

Os reservatórios de acumulação são projetados para o armazenamento de águas pluviais provenientes exclusivamente de telhados, destinando-se ao reaproveitamento para usos não potáveis. Para garantir eficácia, devem ser resistentes, impermeáveis, de fácil manutenção e protegidos contra infiltrações e inundações, mantendo distância mínima da rede de esgoto (SANTOS, 2023).

Segundo Silva (2006), os reservatórios de retardo acumulam águas pluviais para posterior descarte na rede pública. Já os de detenção têm a função de redistribuir

fluxos e reduzir vazões de pico, podendo ainda mitigar poluição urbana e servir para múltiplos propósitos, como lazer e parques.

No entanto, Santos (2023) reitera que os reservatórios de acúmulo trazem significativos benefícios ao meio ambiente, pois promovem o uso eficiente dos recursos hídricos e reduzem a pressão sobre o abastecimento público.

A coleta de água da chuva é uma intervenção que pode contribuir para a gestão do ciclo hidrológico urbano, desempenhando um papel central na construção de uma sociedade mais resiliente frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas. Nesse cenário, a gestão hídrica integrada surge como um novo paradigma para o uso sustentável da água (RIBEIRO, 2016).

3.5 MODELAGEM HIDROLÓGICA

A aplicação de modelos matemáticos na hidrologia, especialmente no âmbito da drenagem urbana, iniciou-se na década de 1960, quando pesquisadores reconheceram o potencial dos computadores digitais como ferramentas eficazes para a simulação de processos hidrológicos. Desde então, observou-se uma expansão significativa no desenvolvimento desses modelos, variando de estruturas simplificadas a sistemas computacionalmente complexos (PORTO *et al.*, 2020).

Nessa conjuntura, os modelos hidrológicos desempenham um papel fundamental na avaliação dos diversos processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, tais como a precipitação, as perdas por interceptação, armazenamento superficial e infiltração, o escoamento superficial e a propagação da vazão ao longo dos cursos d’água. Por sua vez, os modelos hidrodinâmicos são utilizados para descrever o comportamento e o movimento da água dentro da rede de drenagem, considerando as características hidráulicas do escoamento. Esses modelos permitem, por exemplo, simular a velocidade do escoamento, a altura da lâmina d’água em pontos específicos, bem como estimar as cotas e a extensão da planície de inundação (CHAVES, 2023).

Os modelos hidrológicos podem ser classificados de acordo com diferentes critérios, como o tipo de variáveis utilizadas (estocásticas ou determinísticas), as relações entre essas variáveis (empíricas ou conceituais), a representação dos dados (discretos ou contínuos), a presença de relações espaciais (concentrados ou

distribuídos) e a dependência temporal (estacionários ou dinâmicos) (MOREIRA, 2005).

Ao longo das últimas décadas, diversos modelos hidrológicos foram desenvolvidos e têm sido amplamente aplicados na modelagem de bacias hidrográficas, abrangendo uma variedade de características físicas e climáticas. Esses modelos tornaram-se ferramentas imprescindíveis para a simulação de eventos hidrológicos passados e futuros, oferecendo suporte fundamental na tomada de decisões em gestão de recursos hídricos. Dentre os modelos mais destacados, encontra-se o *Storm Water Management Model* (SWMM), que se sobressai em diversas análises (OLIVEIRA, 2024).

3.6 STORM WATER MANAGEMENT MODEL - SWMM

Segundo Rossman (2015), o SWMM é um modelo dinâmico de simulação do processo chuva–escoamento, desenvolvido para representar tanto eventos isolados quanto simulações contínuas de longo prazo, voltadas à avaliação da quantidade e da qualidade do escoamento superficial, principalmente em ambientes urbanos. Sua componente hidrológica baseia-se na divisão da área de estudo em sub-bacias, que recebem precipitação e geram escoamento e cargas poluentes.

O mesmo autor esclarece que a componente hidráulica do modelo realiza o roteamento desse escoamento através de uma rede composta por tubulações, canais, unidades de armazenamento ou tratamento, bombas e dispositivos de controle. Durante a simulação, o SWMM rastreia, a cada intervalo de tempo, a vazão, a profundidade do fluxo e os parâmetros de qualidade da água em cada elemento do sistema de drenagem.

De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), o SWMM é um *software* de código aberto, gratuito e multiplataforma, amplamente utilizado para modelagem de sistemas de drenagem. Originalmente desenvolvido em colaboração com a empresa CDM Smith Inc., é atualmente mantido e aprimorado pelo Escritório de Pesquisa e Desenvolvimento da EPA. O *software* está disponível para uso público em todo o mundo e oferece ferramentas associadas para simulações hidrológicas e hidráulicas de sistemas de escoamento urbano (UNITED STATES, 2023).

Desenvolvido em 1971 e constantemente atualizado, é uma ferramenta amplamente utilizada para o planejamento e dimensionamento de sistemas de drenagem, esgoto sanitário e esgoto combinado. A versão mais recente, o SWMM 5, oferece uma interface integrada em *Windows*, permitindo a edição de dados, execução de simulações e análise de resultados, incluindo mapas, gráficos, tabelas e perfis longitudinais. É uma solução robusta para aplicações urbanas e não urbanas (ROSSMAN, 2015).

O autor explica que o *software* considera diversos processos hidrológicos que afetam a geração de escoamento em áreas urbanas, como a precipitação variável, a evaporação da água acumulada, o acúmulo e derretimento de neve, e a interceptação da chuva por armazenamento em depressões. Além disso, o modelo simula a infiltração da chuva nas camadas de solo não saturadas, a percolação para o lençol freático, o fluxo subterrâneo entre o lençol e o sistema de drenagem, e o roteamento do escoamento superficial por meio de reservatórios não lineares. Também são contempladas práticas LID para captação e retenção do escoamento, proporcionando uma modelagem mais precisa das dinâmicas hidrológicas urbanas.

Collodel (2009) descreve o SWMM como um modelo hidrológico dinâmico que simula hidrogramas a partir de dados de entrada, determinando a quantidade de escoamento gerado em cada sub-bacia, além de avaliar a vazão, profundidade do fluxo e qualidade da água nas tubulações ou canais ao longo do período de simulação. O modelo é amplamente utilizado no dimensionamento de sistemas de drenagem, controle de inundações, mapeamento de áreas de inundaçāo e no estudo das fontes de poluentes, sendo crucial para o controle ambiental em áreas urbanas.

Conforme Rosmann (2015), o modelo também é empregado no dimensionamento de unidades de detenção para controle de enchentes, na elaboração de estratégias para minimizar extravasamentos em sistemas de esgoto combinado, e na avaliação do impacto de infiltrações nos extravasamentos de esgoto sanitário. Além disso, é útil para gerar cargas poluentes difusas e avaliar a eficácia das melhores práticas de gestão (BMP, em inglês *Best Management Practice*) na redução de poluentes durante chuvas.

3.6.1 Caracterização das sub-bacias

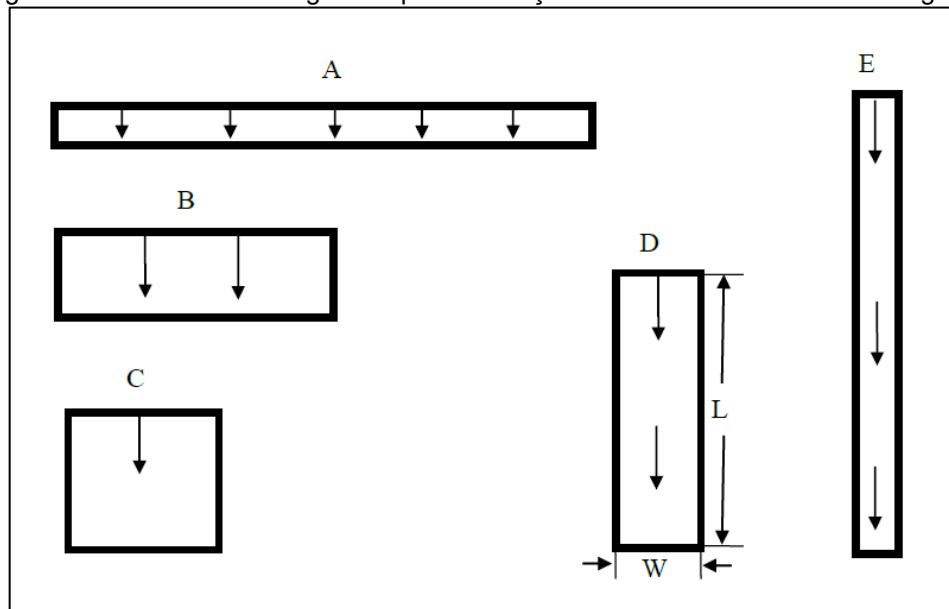
Conforme ROSSMAN e HUBER (2016a), o SWMM é um modelo distribuído que possibilita a subdivisão de uma área de estudo em um número qualquer de sub-bacias de formatos irregulares. Essa abordagem permite representar de forma mais precisa os efeitos da variabilidade espacial da topografia, dos caminhos de drenagem, da cobertura e das características do solo na geração do escoamento. Dessa forma, o cálculo do escoamento é realizado individualmente para cada sub-bacia.

Para cada sub-bacia, o modelo SWMM exige a especificação dos seguintes parâmetros: área total, largura do escoamento superficial, declividade, porcentagem de área impermeável, coeficientes de rugosidade de Manning para as áreas permeáveis e impermeáveis, capacidade de armazenamento nas depressões dessas áreas e a presença de dispositivos de controle LID.

A largura do escoamento superficial é um parâmetro de grande importância, pois influencia diretamente o comportamento do escoamento dentro da sub-bacia. Em uma sub-bacia com formato retangular, onde o escoamento ocorre em uma única direção, essa largura do escoamento superficial (W) pode ser calculada como a razão entre a área da sub-bacia (A_{SB}) e o comprimento do percurso do escoamento (L). Contudo, em sub-bacias com geometrias distintas, o valor da largura do escoamento pode variar significativamente (ROSSMAN e HUBER, 2016a).

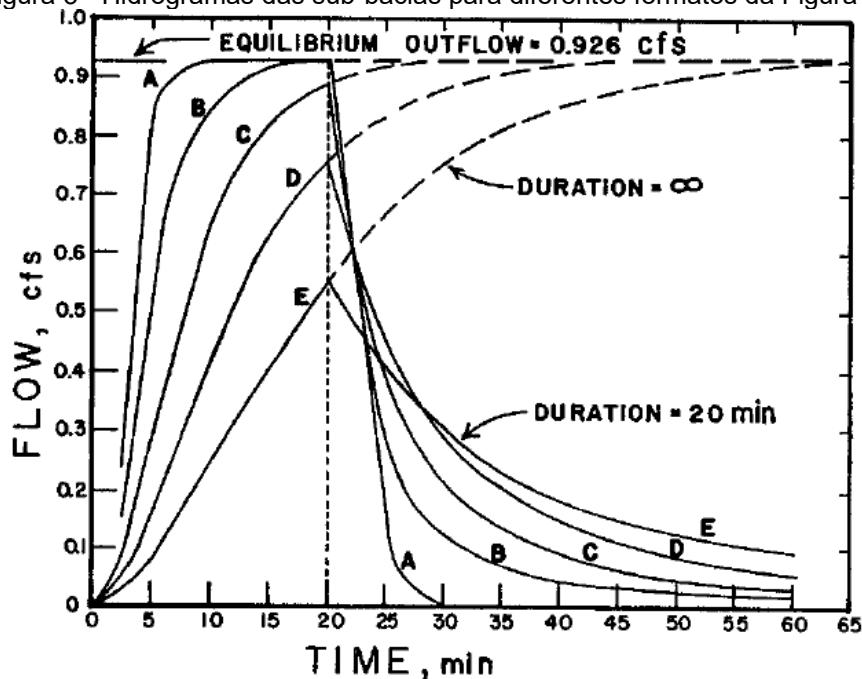
Na Figura 2, ROSSMAN e HUBER (2016a) apresentam cinco diferentes formatos de sub-bacia (A a E), todas com a mesma área (40.000 pés²) e os mesmos parâmetros de modelagem no SWMM. A única diferença entre elas está na largura do escoamento superficial. A Figura 3 exibe os hidrogramas correspondentes, calculados pelos autores utilizando a equação do reservatório não linear, com um intervalo de tempo de 5 minutos. São apresentados os resultados para uma chuva contínua com duração de 20 minutos.

Figura 2 - Sub-bacias retangulares para ilustração dos efeitos da forma e da largura.



Fonte: Rossman e Huber (2016a).

Figura 3 - Hidrogramas das sub-bacias para diferentes formatos da Figura 2.



Fonte: Rossman e Huber (2016a).

Observa-se que, quanto maior o comprimento ao longo do qual o escoamento ocorre e, consequentemente, menor a largura, mais lento será o escoamento e menor o pico de vazão. Do contrário, o escoamento ocorrerá de maneira mais rápida e o pico de vazão será maior, como nas sub-bacias A e B, enquanto nos formatos C, D e E, esse processo ocorre de maneira mais gradual.

Portanto, conclui-se que dependendo da forma que o escoamento for considerado na sub-bacia, pode impactar diretamente a qualidade dos resultados obtidos. Considerando que, na prática, as sub-bacias raramente apresentam formato retangular e que o escoamento pode ocorrer em múltiplas direções, a estimativa da largura do escoamento torna-se um aspecto relevante da modelagem hidrológica, podendo ser realizada por meio de métodos alternativos, conforme descrito por ROSSMAN e HUBER (2016a).

A Equação 1, apresentada a seguir, foi utilizada em estudos como os de Silva e Silva (2020), Krebs *et al.* (2016) e Li *et al.* (2016) para estimar a largura do escoamento.

$$W = k\sqrt{A_{SB}}$$

Equação 1

Onde k é um coeficiente da largura, W representa a largura do escoamento superficial e A_{SB} corresponde à área da sub-bacia.

Krebs *et al.* (2016), ao analisarem a distribuição do parâmetro k em 2.652 sub-bacias, concluíram que $k = 0,7$ representa uma estimativa adequada. Já Li *et al.* (2016) recomendaram valores de k variando entre 0,2 e 5,0, dependendo das características específicas da sub-bacia. Considerando essas referências, Silva e Silva (2020) adotaram o valor de $k = 1,0$ em sua análise.

Essas definições e parâmetros ganham relevância especial quando se considera a complexidade das áreas urbanas, que geralmente apresentam uma combinação de tipos de superfícies. Essas superfícies podem ser convenientemente divididas em duas categorias principais: as permeáveis (como gramados, campos e áreas florestadas), que permitem a infiltração da água da chuva no solo, e as impermeáveis (como telhados, ruas e estacionamentos), onde não ocorre infiltração. Para representar essa diversidade, o modelo permite que cada sub-bacia seja composta por uma subárea permeável e outra impermeável.

Além disso, é comum que superfícies impermeáveis começem a gerar escoamento quase imediatamente após o início de um evento de chuva, mesmo antes de sua capacidade de armazenamento em depressões ser completamente preenchida. Para modelar esse comportamento, o SWMM possibilita que a área

impermeável seja subdividida em duas subáreas: uma com armazenamento em depressões e outra sem (ROSSMAN e HUBER, 2016a).

O software permite simular a presença de depressões na superfície, que possibilitam o armazenamento de uma parte do escoamento. Para representar o armazenamento nas depressões, o volume disponível para tal deve ser distribuído de maneira uniforme na área impermeável. Dessa forma, o escoamento na parcela impermeável da sub-bacia só é gerado quando a precipitação incidente ou o escoamento direcionado a ela excede a capacidade de armazenamento da depressão. Já na parcela permeável, é possível também considerar o armazenamento nas depressões, mas não é permitido subdividir essa área em subáreas com e sem armazenamento (OLIVEIRA, 2024).

Ainda, o parâmetro de entrada %Zero-Imperc define qual fração da área impermeável da sub-bacia não possui armazenamento em depressões, permitindo maior precisão na simulação do escoamento superficial (ROSSMAN e HUBER, 2016a).

Oliveira (2024) destaca que o escoamento gerado em cada parcela da sub-bacia pode ser direcionado tanto para o exultório quanto redistribuído internamente, sendo possível transferir o escoamento entre parcelas impermeáveis (com ou sem armazenamento em depressões) e a parcela permeável. Esse escoamento é distribuído uniformemente e sofre um atraso de pelo menos um passo de tempo. Todas as parcelas da sub-bacia são submetidas às mesmas taxas de precipitação, evaporação, declividade e comprimento do escoamento. Se essas características forem diferentes entre as parcelas, elas devem ser representadas como sub-bacias distintas.

3.6.2 Precipitação

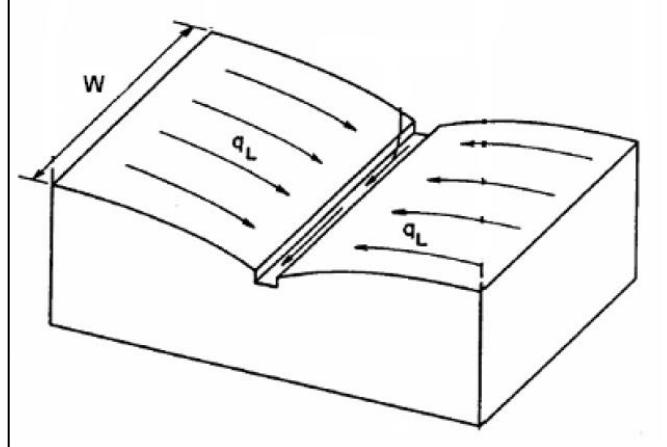
Para Oliveira (2024), a precipitação é o principal dado meteorológico utilizado pelo SWMM para simular a quantidade e qualidade do escoamento. A precipitação é inserida por meio de uma série temporal de dados, que pode representar um único evento ou um conjunto de eventos ao longo de anos. Esses dados são associados a um posto pluviométrico e a uma ou mais sub-bacias, permitindo simular a variação espacial da precipitação.

A precipitação pode ser representada em intensidade, volume ou volume cumulativo e pode ser extraída de postos pluviométricos ou estimada por curvas IDF. O SWMM considera que os dados de precipitação são medidos no início de cada intervalo e recomenda discretizações temporais de até uma hora, não aceitando dados com intervalos superiores a um dia.

3.6.3 Escoamento superficial

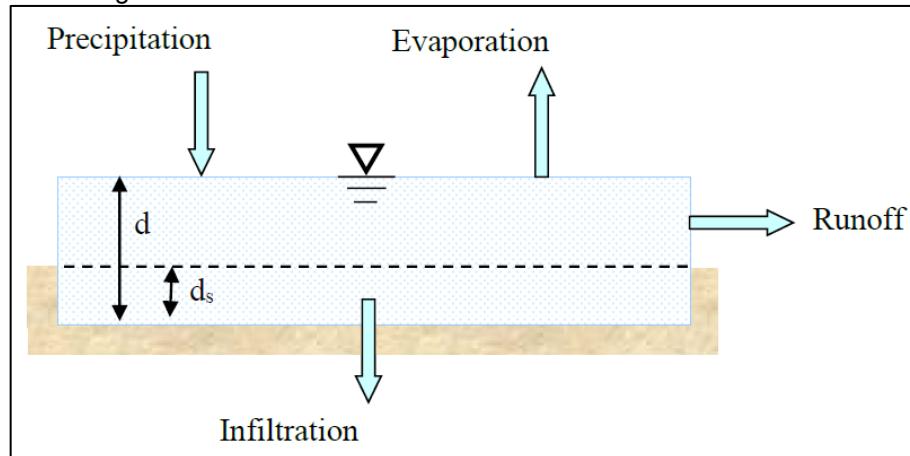
Para estimar o escoamento superficial gerado pela precipitação sobre uma sub-bacia hidrográfica, representada como uma superfície com declividade S e largura W , que escoa para um único canal de saída (Figura 4), o SWMM utiliza um modelo de reservatório não linear (Figura 5).

Figura 4 - Representação idealizada de uma sub-bacia.



Fonte: Rossman e Huber (2016a).

Figura 5 - Modelo de reservatório não linear de uma sub-bacia.



Fonte: Rossman e Huber (2016a).

Nesse modelo, cada sub-bacia recebe a contribuição da precipitação e sofre perdas por evaporação e infiltração. O excesso líquido se acumula na superfície da sub-bacia até atingir uma profundidade d . A água acumulada que ultrapassa a profundidade de armazenamento por depressão d_s pode se transformar em escoamento superficial q . O armazenamento por depressão representa abstrações iniciais da chuva, como o empoçamento na superfície, a interceptação por telhados planos e vegetação, e a umidificação da superfície (ROSSMAN e HUBER, 2016a).

De acordo com o princípio da conservação de massa, a variação da profundidade de água por unidade de tempo é igual à diferença entre as taxas de entrada e saída na sub-bacia, conforme representado na Equação 2:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q \quad \text{Equação 2}$$

Onde, d corresponde à altura da lâmina de água acumulada na superfície da sub-bacia; i é a taxa de precipitação incidente sobre a bacia; e é a taxa de evaporação; f é a taxa de infiltração; e q é a taxa de escoamento superficial.

O modelo assume que o escoamento sobre a superfície da sub-bacia se comporta como se fosse um escoamento uniforme dentro de um canal retangular de largura W , altura $d - d_s$ e declividade S , a equação de Manning (Equação 3) pode ser utilizada para expressar a taxa volumétrica de escoamento Q :

$$Q = \frac{1,49}{n} \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot R_x^{\frac{2}{3}} \cdot A_x \quad \text{Equação 3}$$

Em que, n é o coeficiente de rugosidade da superfície; S é a declividade aparente ou média da sub-bacia; A_x é a área transversal da sub-bacia pela qual o escoamento flui e R_x é o raio hidráulico associado a essa área.

Como W será sempre muito maior que d , a área transversal A_x e o raio hidráulico R_x são calculados a partir dessas equações:

$$A_x = W(d - d_s) \quad \text{Equação 4}$$

$$R_x = d - d_s \quad \text{Equação 5}$$

Substituindo as Equação 4 e Equação 5 na Equação 3, obtém-se:

$$Q = \frac{1,49}{n} \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot (d - d_s)^{\frac{5}{3}} \cdot W \quad \text{Equação 6}$$

Para obter a taxa de escoamento por unidade de área superficial, q , a Equação 6 é dividida pela área superficial A da sub-bacia, que é diferente da área da seção transversal A_x por onde ocorre o escoamento.

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{1,49 \cdot W \cdot S^{\frac{1}{2}}}{A \cdot n} (d - d_s)^{\frac{5}{3}} \quad \text{Equação 7}$$

Substituindo esta equação na relação original de balanço de massa, Equação 2, resulta na Equação 8:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - \frac{1,49 \cdot W \cdot S^{\frac{1}{2}}}{A \cdot n} (d - d_s)^{\frac{5}{3}} \quad \text{Equação 8}$$

De acordo com Oliveira (2024), para resolver as equações supracitadas, o modelo adota algumas convenções específicas. Quando uma sub-bacia é dividida internamente em áreas permeáveis e impermeáveis, são aplicadas as mesmas taxas de precipitação e evaporação, bem como os mesmos valores de largura W e declividade S , a cada subárea.

A taxa de infiltração f é considerada nula nas subáreas impermeáveis, refletindo a impossibilidade de infiltração nesse tipo de superfície. Além disso, podem ser atribuídos valores distintos de armazenamento por depressão d_s e coeficiente de rugosidade n às subáreas permeáveis e impermeáveis, permitindo uma representação mais realista das características físicas de cada porção da sub-bacia.

Assim, é calculada a variação da lâmina escoada nas sub-bacias, sendo a Equação 8 aplicada no modelo quando d é maior que d_s , indicando a ocorrência do escoamento. Quando d é menor ou igual a d_s , o escoamento é considerado zero.

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f \quad \text{Equação 9}$$

3.6.4 Infiltração

A infiltração é o processo pelo qual a água da chuva penetra na superfície do solo, sendo influenciada por fatores como o tipo de solo, o sistema de cultivo, a rugosidade e a cobertura do terreno, bem como pelo teor de umidade pré-existente. Por absorver grande parte da água precipitada, a infiltração desempenha um papel fundamental no planejamento de técnicas conservacionistas baseadas em intervenções físicas no terreno, voltadas ao controle do escoamento superficial (BERTOL *et al.*, 2010).

O SWMM permite ao usuário escolher entre quatro dos métodos de infiltração mais amplamente utilizados: o método de Horton, uma versão modificada do método de Horton, o método de Green-Ampt e o método do Curva Número (Curve Number). Independentemente da opção selecionada, os parâmetros que definem cada método dependem fortemente do tipo e da condição do solo a ser infiltrado (ROSSMAN e HUBER, 2016a).

O Quadro 1 apresenta as principais vantagens e desvantagens de cada um dos métodos de infiltração disponíveis no SWMM.

Quadro 1 - Principais vantagens e desvantagens dos métodos de infiltração.

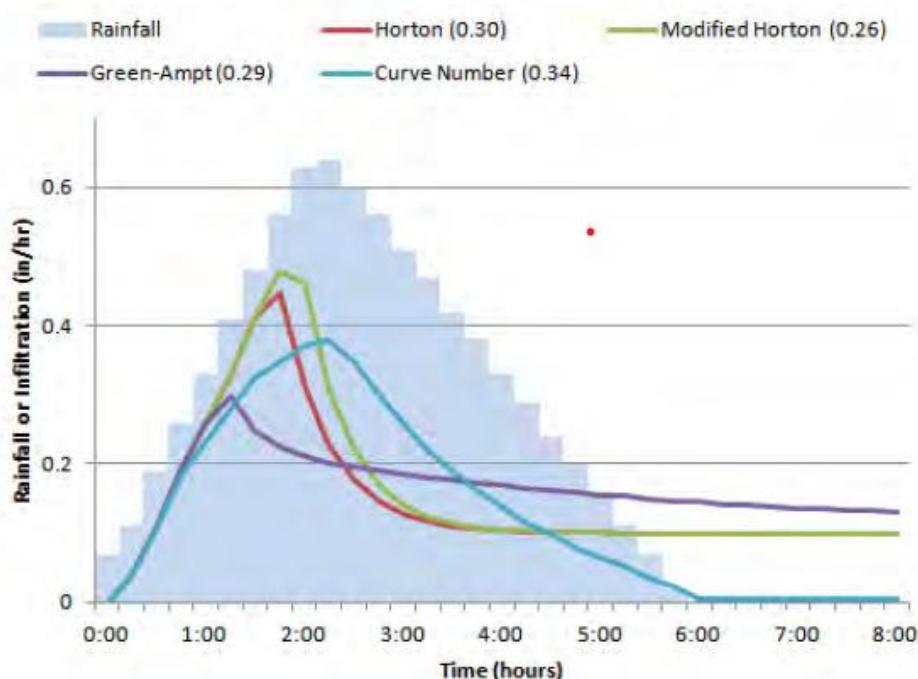
	Vantagens	Desvantagens
Método de Horton	<p>Fácil de entender e implementar.</p> <p>Permite taxas de infiltração variáveis ao longo do evento de chuva.</p>	<p>Não considera as mudanças significativas no conteúdo de umidade do solo ao longo do tempo.</p> <p>Pode não ser adequado para todos os tipos e condições de solo.</p>
Método de Horton Modificado	Semelhante ao método de Horton, mas fornece mais flexibilidade na definição da capacidade de infiltração.	Ainda depende de parâmetros empíricos, o que pode levar a imprecisões se não forem calibrados adequadamente.
Método de Green-Ampt	<p>Modelo baseado fisicamente que incorpora propriedades do solo e conteúdo de umidade.</p> <p>Proporciona uma compreensão mais abrangente dos processos de infiltração.</p>	<p>Requer dados detalhados sobre as propriedades do solo, que podem não estar sempre disponíveis.</p> <p>Mais complexo de implementar em comparação com métodos mais simples.</p>

Método da Curva Número	<p>Amplamente utilizado e aceito em hidrologia, especialmente para avaliações de uso do solo.</p> <p>Simplifica a estimativa de infiltração através de um único parâmetro (Curva Número).</p>	<p>Menos preciso para eventos de chuva específicos devido à sua base empírica.</p> <p>Limitado em representar a dinâmica da umidade do solo em comparação com métodos mais avançados.</p>
------------------------	---	---

Fonte: A autora (2025).

Rossman e Huber (2016a) realizaram um estudo comparativo das taxas de infiltração obtidas pelos diferentes métodos disponíveis no SWMM. Com base nesse estudo, verificaram que, para um evento de chuva com volume acumulado de 50,8 mm, o método do Número de Curva gerou a maior fração (0,34) de chuva convertida em escoamento, ou seja, foi o método que resultou no menor volume de chuva infiltrado. Em contraste, o método de Horton Modificado apresentou a menor fração (0,26) de chuva convertida em escoamento, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Taxas de infiltração produzidas por diferentes métodos para um evento de chuva de 50,8mm (2 polegadas)



Fonte: Rossman e Huber (2016a).

A partir da Figura 6, observa-se que o método de Green-Ampt foi o que apresentou o menor tempo até o pico de infiltração e o pico mais baixo durante o período analisado. Esses resultados evidenciam a influência do método de infiltração

nas simulações realizadas no SWMM, ressaltando aspectos importantes a serem considerados na escolha do método mais adequado aos objetivos da modelagem.

3.6.5 Controles Low Impact Development (LID)

As práticas LID são incorporadas no SWMM, visando à captação e retenção do escoamento superficial. Essas abordagens sustentáveis contribuem para uma representação mais precisa das dinâmicas hidrológicas em áreas urbanas. Segundo a EPA, as soluções baseadas em infraestrutura verde não apenas auxiliam no controle do volume e da velocidade do escoamento, mas também desempenham um papel fundamental na redução da carga de poluentes transportados, promovendo melhorias significativas na qualidade da água urbana (UNITED STATES, 2023).

O SWMM permite que engenheiros e planejadores simulem diferentes combinações de práticas LID, possibilitando a avaliação de sua eficácia na gestão do escoamento urbano. O software representa oito categorias genéricas de infraestrutura verde:

- i. Células de Biorretenção (ou Valas Verdes - *Bioswales*): são depressões com vegetação cultivada em uma mistura de solo projetada, colocada sobre uma camada de drenagem com brita. Essas estruturas proporcionam armazenamento, infiltração e evaporação tanto da chuva direta quanto do escoamento proveniente das áreas ao redor.
- ii. Pavimento Permeável: o pavimento permeável permite que a chuva penetre diretamente pelo pavimento até uma camada de armazenamento com brita, onde pode infiltrar-se no solo nativo em seu ritmo natural. Em sistemas com blocos intertravados, a água é captada pelos espaços entre os blocos e direcionada à zona de armazenamento e ao solo abaixo.
- iii. Telhados Verdes: são uma variação das células de biorretenção, com uma camada de solo sobre um material especial de drenagem que conduz o excesso de água percolada para fora do telhado. Contêm vegetação que permite a infiltração da chuva e a evapotranspiração da água armazenada.
- iv. Valas de Infiltração: são valas estreitas preenchidas com brita, que interceptam o escoamento proveniente de áreas impermeáveis localizadas a montante. Proporcionam volume de armazenamento e tempo adicional para que o escoamento captado se infiltre no solo nativo.

- v. Barris de Chuva ou Cisternas (Captação de Água da Chuva): são recipientes que coletam o escoamento do telhado durante eventos de chuva, podendo liberar ou reutilizar essa água em períodos secos. As cisternas podem ser instaladas acima ou abaixo do solo e possuem maior capacidade de armazenamento do que os barris de chuva.
- vi. Jardins de Chuva: são áreas rebaixadas, com gramíneas, flores e outras plantas, que coletam a água da chuva de telhados, calçadas ou ruas e permitem sua infiltração no solo. Jardins de chuva mais complexos são frequentemente chamados de células de biorretenção.
- vii. Desconexão de Calhas (Condutores de Telhado): essa prática permite que a água da chuva proveniente de telhados seja direcionada para áreas ajardinadas permeáveis, em vez de ir diretamente para os sistemas de drenagem. Pode ser usada para armazenar a água (por exemplo, em barris de chuva) e/ou permitir sua infiltração no solo (como em jardins de chuva ou gramados).
- viii. Valetas Vegetadas (Valas com Vegetação): são canais ou áreas rebaixadas com laterais inclinadas, cobertas com grama ou outra vegetação, que retardam o escoamento coletado, proporcionando mais tempo para sua infiltração no solo nativo.

O controle LID de Barril de Chuva, disponível no SWMM, pode ser utilizado para modelar tanto barris de chuva quanto cisternas, permitindo a simulação de diferentes estratégias de captação e armazenamento de águas pluviais. Os barris de chuva são dispositivos de menor porte, com capacidades que variam entre 50 e 100 galões, geralmente instalados em residências individuais com o objetivo de coletar a água do telhado para fins de irrigação paisagística.

Por outro lado, as cisternas apresentam capacidades significativamente maiores, variando de 250 até 30.000 galões, sendo aplicadas tanto em domicílios quanto em edificações comerciais, principalmente para o aproveitamento da água da chuva em usos internos não potáveis, como descargas sanitárias e lavagem de pisos (ROSSMAN e HUBER, 2016b).

No estudo conduzido por Palla, Gnecco e La Barbera (2017), foi realizada uma análise do desempenho hidrológico de sistemas de captação de água da chuva com base em eventos de precipitação, comparando-se os resultados com um cenário de “nenhuma intervenção”. A avaliação, feita a partir de 2.125 eventos de chuva, indicou

uma taxa média de redução do pico de vazão de 0,33 e de volume de escoamento de 0,26, com valores máximos observados de 0,65 para o pico e 0,51 para o volume. Além disso, identificaram que a profundidade da chuva exerce influência significativa sobre o desempenho hidrológico, quando o total precipitado ultrapassa 20 mm.

Os autores também destacam que os critérios de dimensionamento dos reservatórios, quando baseados na demanda de água e no volume de escoamento como parâmetros principais, asseguram um desempenho satisfatório dos sistemas, inclusive em abordagens simplificadas. Observa-se que o desempenho hidrológico, no que se refere à taxa de redução de volume, é fortemente condicionado pelas características específicas da bacia urbana, como o uso do solo e o percentual de superfícies impermeáveis potencialmente conectadas aos sistemas de captação. Quanto à redução de pico, fatores como as características do sistema de drenagem, as regras de operação e o tipo de dispositivo de descarga hidráulica exercem influência direta sobre o desempenho hidrológico da bacia.

Campisano, Catania e Modica (2016) analisaram a sensibilidade do SWMM ao avaliar o desempenho da opção de barril de chuva do controle LID. Os resultados mostraram que o modelo tende a superestimar a eficiência de retenção de volume e de pico, especialmente em reservatórios com capacidade inferior a 2 m³, típicos de aplicações domésticas. A variabilidade observada nos resultados indica que essa abordagem é mais adequada para simulações de longo prazo do que para eventos isolados.

Embora o desempenho dos sistemas de captação possa ser limitado durante eventos de chuva intensa e de curta duração, sua implementação em escala de bacia urbana tem se mostrado eficaz para a melhoria do desempenho hidrológico da rede de drenagem, inclusive em cenários de projeto com período de retorno de 10 anos. Esses sistemas funcionam como medidas de controle na fonte, contribuindo para a redução de extravasamentos, da carga hidráulica nos sistemas de drenagem, do volume de escoamento a ser tratado e do consumo de água potável, promovendo benefícios significativos à gestão integrada da água urbana (PALLA, GNECCO e LA BARBERA, 2017).

De acordo com Rossman e Huber (2016b), alguns parâmetros são necessários no SWMM para modelar barris de chuva e cisternas, como a altura do reservatório (em polegadas ou milímetros) e o volume, os quais devem ser definidos com base nos tamanhos comercialmente disponíveis. Além disso, é essencial inserir a área da

superfície, o diâmetro do barril, o diâmetro do dreno a ser utilizado e a altura do dreno em relação à base do barril (*offset*).

Os parâmetros de fluxo utilizados no modelo SWMM incluem o expoente e o coeficiente de fluxo. O expoente é fixado em 0,5, enquanto o coeficiente de fluxo é calculado com base em uma fórmula específica apresentada por Rossman e Huber (2016b), conforme descrito na Equação 10.

$$\text{Coeficiente} = 4,8 \cdot \left(\frac{D_{dreno}}{D_{barril}} \right)^2 \cdot 62768 \quad \text{Equação 10}$$

Uma das limitações do modelo SWMM é o número máximo de unidades que pode ser atribuído a cada sub-bacia, que é restrito a 1000 unidades. Outra premissa importante é a necessidade de indicar os percentuais de área impermeável e permeável que serão tratados pelo barril de chuva; caso essa informação não seja fornecida, o barril de chuva não será acionado na simulação. Por fim, Oliveira (2024) enfatiza que quando assume que o barril de chuva é coberto, significa que não há contribuição da precipitação incidente nem perda do volume armazenado devido à evaporação.

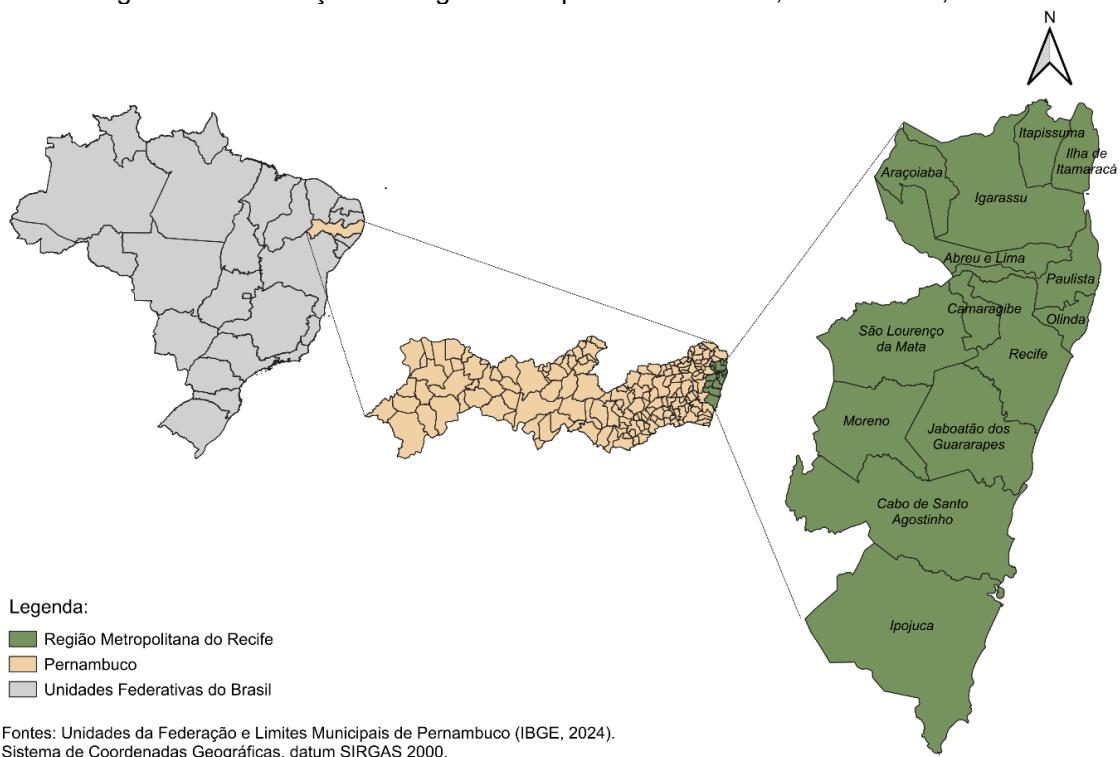
4 METODOLOGIA

A metodologia adotada iniciou-se com a caracterização da Região Metropolitana do Recife, seguida pela coleta de dados pluviométricos e pela definição da demanda de água não potável. Em seguida, o volume dos reservatórios de aproveitamento de água pluvial foi determinado para cada município, por meio da combinação dos métodos de Monte Carlo e Rippl. Posteriormente, definiu-se a área do estudo de caso e realizou-se a caracterização das sub-bacias. Os eventos de chuva foram selecionados, e os parâmetros de infiltração e das práticas de LID foram inseridos no modelo hidrológico. Por fim, foram definidos os cenários de modelagem, realizadas as simulações e analisados os resultados.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE

A Região Metropolitana do Recife – RMR é composta por 14 municípios, Abreu e Lima, Araçoiaba, Camaragibe, Cabo de Santo Agostinho, Igarassu, Ilha de Itamaracá, Ipojuca, Itapissuma, Jaboatão dos Guararapes, Moreno, Olinda, Paulista, Recife e São Lourenço da Mata (Figura 7).

Figura 7 - Localização da Região Metropolitana do Recife, Pernambuco, Brasil.



A população da RMR é de 3.726.974 (SIDRA – IBGE, 2022b), o que representa 41,14% da população total do estado de Pernambuco. A Região está localizada na faixa litorânea com uma área de 2.761,93 km². A Tabela 1 traz os dados referentes à área, população e PIB por município.

Tabela 1 - Área, população e PIB por município da RMR¹.

Município	Área (km ²) *	Habitantes *	PIB a preços correntes (Mil Reais) **
Abreu e Lima	126,384	98.462	R\$ 1.724.258,00
Araçoiaba	96,36	19.243	R\$ 161.884,00
Cabo de Santo Agostinho	445,386	203.440	R\$ 13.706.389,00
Camaragibe	51,321	147.771	R\$ 2.229.680,00
Igarassu	306,879	115.196	R\$ 3.471.427,00
Ilha de Itamaracá	521,801	24.540	R\$ 299.232,00
Ipojuca	66,146	98.932	R\$ 14.929.346,00
Itapissuma	73,968	27.749	R\$ 2.383.641,00
Jaboatão dos Guararapes	258,724	644.037	R\$ 16.133.556,00
Moreno	194,197	55.292	R\$ 892.506,00
Olinda	41,3	349.976	R\$ 5.788.250,00
Paulista	96,932	342.167	R\$ 5.591.652,00
Recife	218,843	1.488.920	R\$ 54.970.305,00
São Lourenço da Mata	263,687	111.249	R\$ 1.444.200,00

Fonte: Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA (2022b) *, (2021) **

A Região possui predominantemente um perfil urbano, consequentemente a população e as atividades rurais são pouco significativas. A área urbanizada concentra-se principalmente nos arredores do centro da capital Recife, em um raio de aproximadamente dez quilômetros, estendendo-se aos municípios vizinhos (MACIEL e CRESPO, 2021).

A intensa urbanização das metrópoles acarreta impactos ambientais, gerando pressão e degradação dos recursos naturais, poluição do ar e da água. Também torna a área propensa a desastres naturais, como enchentes e inundações, o que aumenta a vulnerabilidade das populações urbanas a esses eventos.

A RMR apresenta um clima tropical úmido de estações seca e chuvosa distintas, com temperaturas médias elevadas ao longo do ano e uma distribuição de chuvas bem definida, influenciadas pela posição geográfica próxima ao litoral. Essa região é impactada pela ocorrência de chuvas intensas, que combinadas com a urbanização desordenada, dificulta o escoamento das águas pluviais.

¹ Tabela organizada pela autora com base nos dados informados pelo IBGE.

O período chuvoso geralmente é observado entre os meses de abril e julho, com precipitações intensas e frequentes, que auxiliam na recarga dos reservatórios de água e para a vegetação local. Em contrapartida, a estação seca ocorre entre agosto e março, caracterizada por chuvas escassas e temperaturas mais altas. Durante esse período, a região pode enfrentar estiagem e baixa umidade relativa do ar, o que pode afetar a disponibilidade de água.

A variabilidade espacial da precipitação na RMR é fortemente influenciada pelas características do relevo, com as áreas de maior altitude registrando padrões pluviométricos distintos em relação às zonas mais baixas. Essa interação entre relevo e precipitação é fundamental para compreender a distribuição das chuvas na região, influenciando diretamente os processos ambientais e os impactos socioeconômicos associados aos eventos extremos.

O relevo da RMR caracteriza-se por uma diversidade de formações, combinando planícies, tabuleiros costeiros e colinas. Essa variação geográfica exerce influência direta sobre a ocupação e o desenvolvimento urbano da região. As áreas mais baixas, compostas por planícies litorâneas, destacam-se pela maior densidade populacional, uma vez que apresentam terrenos planos e favoráveis à construção de infraestrutura.

Em contraste, as zonas de colinas, com relevo mais acidentado e altitudes que podem atingir até 200 metros, são menos densamente povoadas, devido às dificuldades impostas pela topografia para a urbanização e construção. Assim, o relevo desempenha um papel crucial na configuração socioespacial da região, moldando a distribuição populacional e as dinâmicas de uso do solo.

A combinação da acelerada urbanização com a presença de morros e a carência de infraestrutura de drenagem adequada tem contribuído significativamente para a recorrência de enchentes, deslizamentos de massa e alagamentos na RMR, ocasionando impactos sociais e econômicos expressivos. A história dessa região é marcada por eventos extremos, com episódios trágicos de alagamentos que resultaram em perdas humanas e no deslocamento da população (SILVA, 2018).

O autor ressalta ainda que esse cenário se torna ainda mais preocupante diante das alterações no ciclo hidrológico, intensificadas pelas mudanças climáticas, que tendem a aumentar tanto a frequência quanto a intensidade das chuvas. Dessa forma, a caracterização do clima e da fisiografia da região evidencia a urgência de compreender a variabilidade espaço-temporal da pluviosidade e seus impactos,

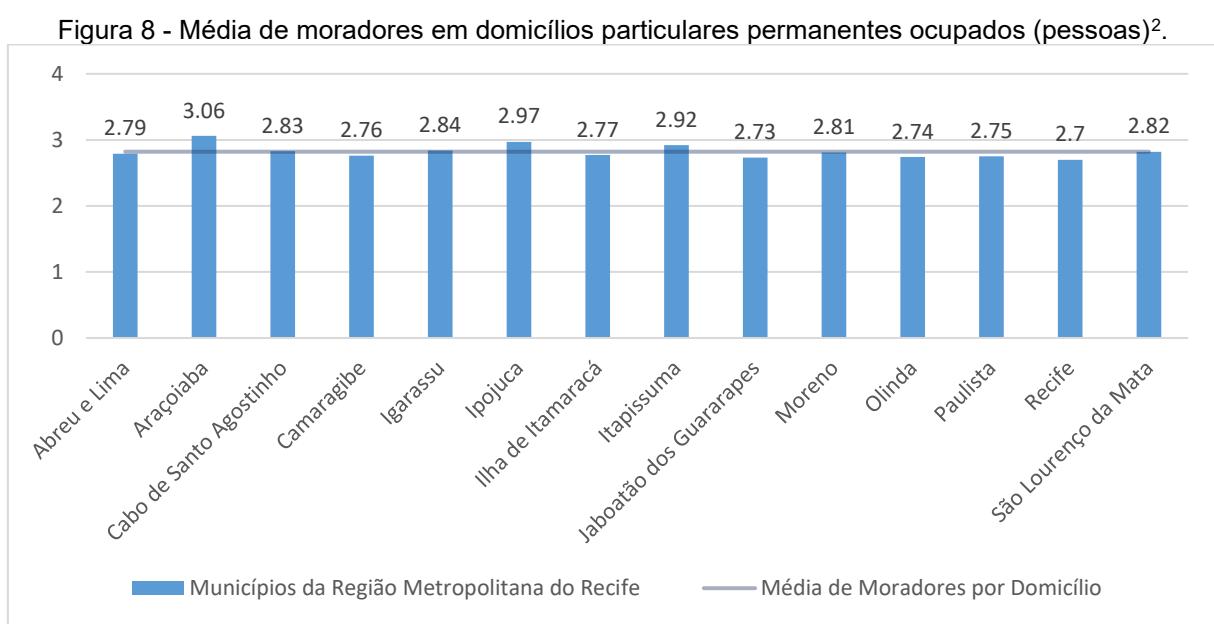
especialmente para subsidiar ao planejamento urbano, à gestão dos recursos hídricos e à formulação de estratégias de adaptação às novas condições climáticas.

4.2 COLETA DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Foram utilizados os dados pluviométricos disponíveis no website do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN referente às séries históricas de precipitações das 99 estações pluviométricas situadas na RMR. Os dados das séries foram tratados com o auxílio do software *Microsoft Excel*, onde foram selecionadas as precipitações totais mensais, compreendidas de 2014 a 2023. A caracterização das estações pluviométricas está detalhada no **Apêndice A**.

4.3 DEMANDA PARA USO DE ÁGUA NÃO POTÁVEL E ÁREA DE CAPTAÇÃO

De acordo com o Censo Demográfico realizado pelo IBGE (2022a), a população do estado de Pernambuco era de 9.058.931 habitantes, com uma média de 2,83 moradores por domicílio. A média observada para a RMR equivale a 2,82, consequentemente, adotou-se 3 moradores por domicílio para desenvolvimento da pesquisa. A Figura 8 ilustra a média de moradores em domicílios por município da região.



Fonte: Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA (2022a).

² Gráfico organizado pela autora com base nos dados informados pelo IBGE.

Para o cálculo da demanda, utilizou-se como referência uma residência unifamiliar, com apenas um pavimento (residências térreas) e área de coberta/coleta (A_C) de 100 m², habitada por três pessoas. Presumiu-se que as águas pluviais coletadas seriam aproveitadas em bacia sanitária, lavagem de veículos, lavagem de pisos e/ou rega de jardins.

Baseado nos parâmetros apresentados por Tomaz (2010), estimou-se que cada morador acionaria, por dia, cinco vezes a descarga da bacia sanitária com caixa acoplada de 6 litros, resultando em uma demanda diária de 90 litros. Para a lavagem de veículos, adotou-se uma lavagem por semana resultando em 150 litros.

Finalmente, para a lavagem de pisos e/ou rega de jardins, estabeleceu-se a área fundamentada no inciso II do Art. 4º da Lei Federal Nº 6.766 (BRASIL, 1979), em que fixa que os lotes terão área mínima de 125 m², resultando em 25 m² para esses fins. Considerando o consumo dessa atividade sendo 2 L/m² e a frequência de 3 vezes na semana, o resultado é de 150 litros por semana. O resumo da demanda de água de chuva por atividade encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Demanda de água de chuva por atividade

Atividade	Demanda por atividade
Bacia Sanitária	90L/dia
Lavagem de veículos	150L/semana
Lavagem de piso e/ou rega de jardins	150L/semana

Fonte: A autora (2024).

Acrescentando-se 5% no volume da demanda devido a perdas por vazamentos, o valor total da demanda de água da chuva por mês corresponde a 4,095 m³.

4.4 DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIO

O cálculo do volume do reservatório de água de chuva foi definido através do Método de Rippl isolado e do Método de Monte Carlo combinado com o Método de Rippl.

4.4.1 Método de Monte Carlo

O Método de Monte Carlo é frequentemente utilizado por hidrologistas no dimensionamento de reservatórios destinados ao abastecimento de água potável ou à geração de energia elétrica (TOMAZ, 2010).

Monte Carlo abrange técnicas de simulação estocástica que são amplamente aplicáveis para resolver diversos problemas de otimização e inferência em ciência e engenharia. Esse método opera adquirindo um extenso conjunto de valores potenciais para os parâmetros desejados e substituindo as integrações por médias amostrais. Efetivamente, esses valores de parâmetros podem ser obtidos reproduzindo fisicamente a experiência desejada ou caracterizando-a probabilisticamente e gerando um conjunto de realizações aleatórias (LUENGO *et al.*, 2020).

Segundo Tomaz (2010), o método de simulação Monte Carlo é executado em três fases: a primeira consiste em determinar a entrada dos dados (série histórica de precipitações mensais); a segunda é transformar a entrada em saída (utilizando o Método Rippl) e a terceira dar-se-á por meio da análise dos dados obtidos referentes aos volumes dos reservatórios.

4.4.2 Método de Rippl

O Método de Rippl, conhecido como diagrama de massa, é frequentemente adotado no dimensionamento de reservatórios em sistemas de aproveitamento de água pluvial. Esse método geralmente apresenta o valor extremo do volume do reservatório, equivalendo à referência máxima (TOMAZ, 2010).

O volume do reservatório deve ser determinado a partir das equações a seguir.

$$S_{(t)} = D_{(t)} - Q_{(t)}$$

Equação 11

$$Q_{(t)} = C \cdot P \cdot A_c$$

Equação 12

$V = \sum S_{(t)}$, somente para valores $S_{(t)} > 0$

Sendo que: $\sum D_{(t)} < \sum Q_{(t)}$

$S_{(t)}$ é o volume de água no reservatório no tempo t (m^3);

$Q_{(t)}$ é o volume de chuva aproveitável no tempo t (m^3);

$D_{(t)}$ é a demanda ou consumo no tempo t (m^3);

V é o volume do reservatório (m^3);

C é o coeficiente de escoamento superficial, onde foi adotado o valor de 0,80, que de acordo com Tomaz (2010), geralmente é utilizado para o caso de captação de água de chuva.

P é a precipitação da chuva (mm);

A_c é a área de captação (m^2);

O diagrama de massa de Rippl pode ser executado para demanda constante ou variável. Além disso, é permitido usar séries históricas mensais ou diárias. Para esse estudo, estabeleceu-se demanda constante e séries históricas mensais.

No cálculo do volume de um reservatório através do método de Rippl da maneira convencional, ou seja, a partir da série de precipitações médias mensais, a probabilidade de utilização completa desse volume não é definida, resultando em incertezas em relação à suficiência ou insuficiência do reservatório diante das precipitações reais que ocorrerão. Diante disso, a combinação do método de Rippl com o método de Monte Carlo apresenta a vantagem de obter valores para os volumes dos reservatórios associados às probabilidades de ocorrência das precipitações (RIBAS e MELLO, 2014).

4.5 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Este item descreve o processo de modelagem hidrológica realizado com o objetivo de simular o comportamento do escoamento superficial em diferentes cenários. A área escolhida para aplicação da modelagem foi o bairro de Jardim Monte Verde, localizado no município do Recife, por apresentar características representativas dos desafios de drenagem urbana enfrentados na RMR.

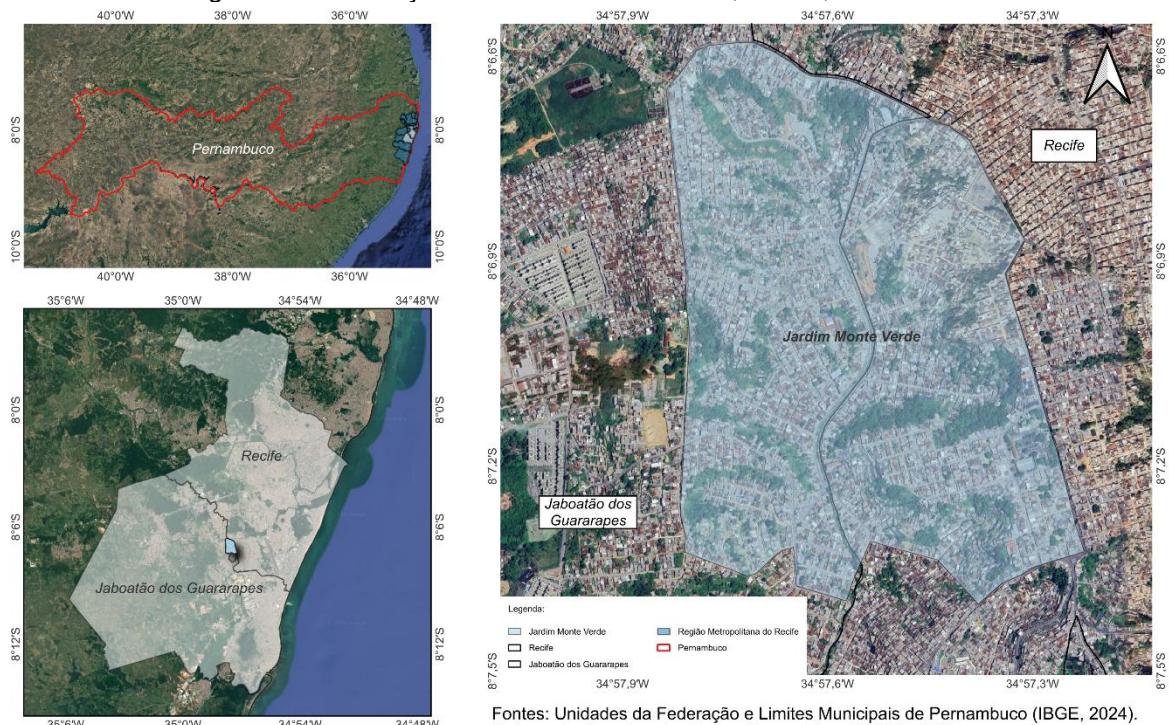
Inicialmente, foi realizada a caracterização da área, seguida da subdivisão do bairro em sub-bacias, com a determinação dos principais parâmetros de entrada exigidos pelo modelo SWMM, tais como largura do escoamento, declividade, áreas impermeáveis, coeficiente de Manning, armazenamento em depressões e a fração da área impermeável sem armazenamento.

Foram definidos eventos de precipitação representativos com variação de duração, intensidade e volume acumulado, de forma a permitir a análise do desempenho do sistema desde eventos menos severos até os mais intensos. Esses eventos foram inseridos no modelo juntamente com os parâmetros técnicos dos bairros de chuva. Por fim, foram estabelecidos diferentes cenários de simulação com o intuito de avaliar o desempenho dos variados volumes dos dispositivos de armazenamento frente ao escoamento superficial.

4.5.1 Jardim Monte Verde: Estudo de caso

A comunidade de Jardim Monte Verde, situada em uma região de encosta entre os bairros de Dois Carneiros (a Oeste) e da COHAB (a Leste), destaca-se por sua ocupação desordenada em uma área marcada por vulnerabilidades socioambientais. Localizado em uma zona de litígio territorial entre os municípios de Jaboatão dos Guararapes e Recife (Figura 9), em Pernambuco, o território evidencia desafios relacionados à gestão urbana e ao ordenamento do solo (POTDEVIN, 2023).

Figura 9 - Localização de Jardim Monte Verde, Recife, Pernambuco



Fonte: A autora (2025).

Jardim Monte Verde está inserida em uma área pertencente à Formação Barreiras, caracterizada por sua composição areno-argilosa e por apresentar baixa consolidação dos materiais, o que lhe confere elevada suscetibilidade a processos erosivos e movimentos de massa. Essa unidade geológica é considerada ambientalmente instável, especialmente em áreas de encosta, devido à combinação de suas propriedades físicas com a ocupação desordenada (MELO *et al.*, 2022).

Os autores explicam que durante eventos de precipitação, a água infiltra-se facilmente pela camada arenosa superior, acumulando-se sobre a camada inferior de argila, que é impermeável. Esse acúmulo promove o encharcamento da porção arenosa, reduzindo ainda mais sua coesão e aumentando significativamente o risco de deslizamentos.

Esses depósitos areno-argilosos, com coloração variando entre o amarelo e o avermelhado, assentam-se sobre o embasamento cristalino e originam elevações ativas e terraços fluviais em áreas mais elevadas. A formação geológica da região está associada a eventos climáticos e tectônicos do final do período Terciário, que resultaram na deposição desses materiais instáveis. Tal configuração geomorfológica reforça a vulnerabilidade das áreas ocupadas, como Jardim Monte Verde, frente a eventos de instabilidade de encostas (ALHEIROS, 1988).

No final de maio de 2022, a RMR foi atingida por eventos extremos de pluviosidade, cujos volumes acumulados em curto período de tempo provocaram sérios desequilíbrios nas áreas de encosta. Jardim Monte Verde foi uma das localidades mais afetadas, sofrendo diretamente com movimentos de massa que impactaram severamente a comunidade. O deslizamento de encostas resultou em dezenas de óbitos e deixou centenas de pessoas desabrigadas, configurando uma tragédia de grandes proporções. Esse evento evidenciou de forma contundente a vulnerabilidade da ocupação em áreas de risco e reforçou a urgência de ações estruturais e preventivas voltadas à mitigação de desastres em territórios urbanos sujeitos à instabilidade geológica e à precariedade habitacional. (POTDEVIN, 2023).

4.5.2 Caracterização das sub-bacias

Na região de Jardim Monte Verde, a área foi discretizada em três tipos de sub-bacias: telhados e ruas, classificadas como superfícies impermeáveis; e áreas de

vegetação, consideradas superfícies permeáveis. Para determinar as áreas permeáveis e impermeáveis da região foi realizada a classificação de cobertura do solo da região de estudo utilizando os dados da *WorldCover*.

O *WorldCover* da Agência Espacial Europeia (ESA) é um mapa global de cobertura do solo para os anos de 2020 e 2021, com uma resolução espacial de 10 metros, desenvolvidos e validados quase em tempo real a partir dos dados dos satélites Sentinel-1 e Sentinel-2. Essa iniciativa representa um avanço significativo na integração de dados de sensoriamento remoto para o mapeamento preciso da cobertura terrestre em escala global, impulsionando aplicações em monitoramento ambiental, gestão de recursos naturais e planejamento territorial.

A Agência Espacial Europeia (ESA) disponibiliza a legenda das classes de cobertura do solo, que podem ser observadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Legenda das classes de cobertura do solo

Cor	Código	Class	Classe
[Dark Green]	10	<i>Tree cover</i>	Cobertura arbórea
[Orange]	20	<i>Shrubland</i>	Vegetação arbustiva
[Yellow]	30	<i>Grassland</i>	Pastagem / Campo
[Pink]	40	<i>Cropland</i>	Área agrícola / Cultivo
[Red]	50	<i>Built-up</i>	Área construída
[Grey]	60	<i>Bare / sparse vegetation</i>	Vegetação escassa / Solo exposto
	70	<i>Snow and ice</i>	Neve e gelo
[Blue]	80	<i>Permanent water bodies</i>	Corpos d'água permanentes
[Teal]	90	<i>Herbaceous wetland</i>	Pântano herbáceo / Área úmida herbácea
[Green]	95	<i>Mangroves</i>	Manguezais
[Yellow-Gold]	100	<i>Moss and lichen</i>	Musgos e líquens

Fonte: ESA WorldCover (2021).

Neste estudo, foram utilizados dados do ano de 2021 referentes à região S09W036, que abrange a cidade do Recife. Esses dados foram importados para o software QGIS, versão 3.40.3, e a classificação do solo foi obtida por meio da ferramenta de processamento *r.report*. A imagem da classificação está na Figura 10 e as áreas correspondentes a cada classe de solo estão definidas na Tabela 3.

Figura 10 - Classificação da cobertura do solo da região de Jardim Monte Verde



Legenda:

□ Recife
□ Jaboatão
□ Jardim Monte Verde

Uso e Ocupação do Solo
30
10
50
20

Fontes: Limites Municipais de Pernambuco (IBGE, 2024); Uso e Ocupação do Solo S09W036 (ESA WorldCover, 2021).

Sistema de Coordenadas Geográficas, datum SIRGAS 2000.

Fonte: A autora (2025).

Tabela 3 - Distribuição das áreas por classe de solo (km²)

Código	Classe	Área (km ²)
10	Cobertura arbórea	0,313887
20	Vegetação arbustiva	0,002550
30	Pastagem / Campo	0,005525
50	Área construída	0,904942
	Total	1,226904

Fonte: A autora, 2025.

Com base nos valores extraídos do QGIS, verificou-se que a área impermeável da região analisada corresponde a 0,904942 km² (90,4942 hectares), representando aproximadamente 73,76% da área total, enquanto a área permeável totaliza 0,321962 km² (32,1962 hectares), equivalente a cerca de 26,24%. Para fins de modelagem, considerou-se que 10% da área impermeável corresponde a vias públicas, resultando em uma estimativa de 9,04942 hectares destinados às ruas e 81,44478 hectares aos telhados.

Ressalta-se, contudo, que a definição precisa dessas proporções a partir de imagens de satélite apresenta limitações, especialmente no que diz respeito à

diferenciação entre superfícies impermeáveis, como telhados e pavimentações, o que pode impactar a acurácia da segmentação.

A largura do escoamento superficial em cada sub-bacia foi calculada com base na Equação 1, adotada como referência para a caracterização hidrológica das áreas, sendo o coeficiente k definido como 1. Já a declividade das superfícies, tanto nas áreas permeáveis quanto nas vias, foi determinada por meio da análise topográfica realizada no *Google Earth Pro*. Para isso, utilizou-se o recurso de medição de elevação ao longo de perfis selecionados, sendo considerado o valor médio de declividade para cada tipo de superfície, a fim de representar de forma mais realista as condições locais.

Para a definição da porcentagem de impermeabilização, considerou-se que as áreas classificadas como impermeáveis apresentam 100% de impermeabilidade, enquanto as áreas permeáveis foram consideradas com 0% de impermeabilidade, assumindo total capacidade de infiltração. Quanto ao coeficiente de rugosidade de Manning, adotaram-se os valores propostos por Yen (2001), os quais foram calculados com base na análise da onda cinemática, conforme descrito por Rossman e Huber (2016a).

Os valores de armazenamento das depressões superficiais, tanto para as áreas impermeáveis quanto para as permeáveis, foram definidos com base nas médias propostas por Rossman e Huber (2016a). Esses valores indicam a fração da área impermeável da sub-bacia que não contribui para o escoamento superficial.

Em vista disso, a definição desses parâmetros é essencial para garantir uma representação precisa das condições reais de escoamento no modelo hidrológico, o que, contribui para a confiabilidade das simulações e análises realizadas. Os valores adotados para cada sub-bacia estão detalhados no **Apêndice B**.

4.5.3 Precipitação

A seleção e caracterização dos eventos de chuva utilizados na modelagem hidrológica foram realizadas com base nos dados pluviométricos disponibilizados pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), referentes à estação localizada no bairro do Ibura (coordenadas geográficas: -8,122; -34,955), próxima à área de estudo em Jardim Monte Verde. O período analisado corresponde aos meses de março a junho de 2022, intervalo no qual se concentrou

uma expressiva quantidade de precipitação, totalizando 1838,72 mm — o que equivale a aproximadamente 63,49% do acumulado anual, como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Precipitação acumulada registrada em 2022 na estação pluviométrica do Ibura³.

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
170.38	58.55	424.56	237.17	703.68	473.31	289.18	172.41	122.24	78.38	106.08	59.96

Fonte: A autora (2025).

Para a definição dos eventos de chuva, foram adotadas algumas premissas metodológicas importantes. Considerou-se como encerrado um evento sempre que fossem registrados dois intervalos consecutivos sem precipitação (dois valores iguais a zero), o que corresponde a um período de 20 minutos de inatividade, assumindo-se que esse critério é suficiente para caracterizar a descontinuidade entre dois eventos distintos. Por outro lado, a ocorrência isolada de um valor zero entre registros positivos foi desconsiderada como indicativo de fim de evento, por se tratar possivelmente de uma falha momentânea do pluviômetro ou de uma breve interrupção que não compromete a continuidade da chuva.

Adicionalmente, eventos de chuva com duração inferior a 20 minutos foram desconsiderados na análise, por apresentarem baixa representatividade hidrológica e por não refletirem, de forma significativa, o comportamento do escoamento superficial urbano. Esses eventos, geralmente muito breves e de baixa intensidade, tendem a ter impacto limitado na eficiência dos sistemas de drenagem e nos controles LID simulados no SWMM, não justificando sua inclusão na modelagem.

Os eventos identificados foram inicialmente organizados em ordem crescente de precipitação acumulada. Em seguida, os dados foram agrupados em faixas de precipitação (5–10 mm; 10,1–20 mm; 20,1–30 mm; 30,1–40 mm; 40,1–50 mm; 50,1–60 mm, 60,1–70 mm e acima de 70 mm), com o objetivo de selecionar eventos representativos tanto de chuvas intensas quanto de eventos menos severos.

Para cada faixa, foram selecionados de um a dois eventos: nas faixas com mais de duas ocorrências, optou-se por incluir os eventos com maior e menor intensidade; nas faixas com apenas um evento disponível, este foi automaticamente selecionado. Visando manter a relevância dos dados utilizados na modelagem, foram excluídos os

³ Tabela organizada pela autora com base nos dados informados pelo CEMADEN.

eventos com precipitação acumulada inferior a 5 mm, por se tratar de chuvas com impacto hidrológico pouco significativo para o propósito deste estudo.

Durante o período analisado, de março a junho de 2022, foram catalogados um total de 262 eventos. A Tabela 5, a seguir, distribui esses eventos por faixa de precipitação.

Tabela 5 - Distribuição dos eventos registrados entre março e junho de 2022, por faixa de precipitação.

Faixa de Precipitação (mm)	Número de Eventos
≤ 5	193
5,1 – 10	29
10,1 – 20	21
20,1 – 30	3
30,1 – 40	9
40,1 – 50	3
50,1 – 60	2
60,1 – 70	1
> 70	1

Fonte: A autora (2025).

A partir dos eventos selecionados, foram calculadas as respectivas intensidades (em mm/h), considerando-se a duração total de cada evento. Essa análise permitiu a identificação de uma diversidade de cenários, com diferentes durações, volumes e intensidades de precipitação, fornecendo uma base robusta para avaliar o comportamento do sistema de drenagem sob distintas condições pluviométricas. A caracterização detalhada da duração e intensidade de cada ocorrência está disponibilizada no **Apêndice C**.

Cabe destacar que a escolha criteriosa dos eventos se justifica pela conhecida limitação de desempenho dos dispositivos LID frente a precipitações extremas, sendo, portanto, essencial considerar uma gama variada de situações para uma análise realista e abrangente no contexto urbano da área de estudo.

A Tabela 6 apresenta a caracterização detalhada dos eventos de chuva selecionados para a modelagem no SWMM, incluindo informações sobre a duração, precipitação acumulada e intensidade média de cada evento.

Tabela 6 - Caracterização dos eventos de chuva selecionados para modelagem no SWMM

Evento	Data	Hora final	Precipitação total (mm)	Duração (min)	Intensidade (mm/h)	Classificação ⁴
1	05/03/2022	04:40:00	5.11	110	2.79	Fraca
2	05/03/2022	22:00:00	36.46	150	14.58	Forte
3	06/03/2022	08:30:00	54.16	230	14.13	Muito forte
4	22/03/2022	04:20:00	23.95	260	5.53	Forte
5	22/03/2022	14:50:00	40.74	140	17.46	Forte
6	30/03/2022	21:40:00	15.69	30	31.38	Moderada
7	03/04/2022	05:10:00	26.86	80	20.15	Forte
8	24/04/2022	05:50:00	9.26	20	27.78	Fraca
9	25/05/2022	16:40:00	30.91	510	3.64	Forte
10	25/05/2022	02:10:00	43.85	360	7.31	Forte
11	28/05/2022	15:40:00	200.03	860	13.96	Muito forte
12	07/06/2022	11:30:00	62.25	590	6.33	Muito forte
13	22/06/2022	22:20:00	59.51	250	14.28	Muito forte
14	29/06/2022	21:20:00	12.19	210	3.48	Moderada

Fonte: A autora (2025).

4.5.4 Infiltração

Para a presente modelagem, optou-se pela utilização do método de infiltração de Green-Ampt, em razão de suas características que o tornam particularmente adequado para uma análise mais detalhada do processo hidrológico deste estudo.

Trata-se de um modelo baseado em princípios físicos, que incorpora propriedades específicas do solo, como condutividade hidráulica e carga de succção, além do déficit inicial de umidade. Essa abordagem permite uma representação mais realista e fundamentada da dinâmica de infiltração, proporcionando uma compreensão mais abrangente dos processos envolvidos na percolação da água no solo durante eventos de chuva.

Os parâmetros utilizados no SWMM para o método de infiltração de Green-Ampt estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros utilizados para o método de infiltração de Green-Ampt

Classificação do Solo	Carga de Succção	Condutividade	Déficit inicial
Argilo-arenoso ⁵	9.41 pol	239.014 mm	0.02 pol/h 0.508 mm/h 0.321

Fonte: Rossman e Huber (2016).

⁴ Classificação baseada nas faixas de precipitação do *Manual de Observações Meteorológicas de Superfície* da Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2008).

⁵ Classificação do solo da RMR segundo Alheiros (1988).

4.5.5 Parâmetros do LID

Os parâmetros exigidos pelo SWMM para o controle LID foram definidos com base na análise das características da área de estudo. Inicialmente, os volumes dos barris de chuva utilizados foram determinados conforme a metodologia apresentada no item 4.4, sendo posteriormente arredondados para inserção no modelo.

Para padronização, fixou-se a altura dos barris em 2000 mm para todos os quatro volumes distintos analisados. Considerou-se ainda que os barris seriam cobertos, de modo que não haveria perda de volume por evaporação. O diâmetro do dreno foi definido em $\frac{3}{4}$ pol (19,05 mm) e, com base na Equação 10, foi calculado o coeficiente de fluxo, enquanto o expoente de fluxo foi mantido fixo em 0,5. Ainda, foi estabelecida a posição do dreno (*offset*) em relação à base do reservatório.

Após a definição dos parâmetros, foi realizada a configuração no Editor LID do SWMM, com a inserção das áreas correspondentes a cada barril e a quantidade de unidades por sub-bacia. Considerando a limitação do SWMM de até 1000 unidades por sub-bacia, a área total de telhados foi dividida em nove sub-bacias: oito com 10 hectares, cada uma contendo 1000 barris, e uma com 1,44478 hectares, na qual foram alocados 145 barris.

A largura do escoamento superficial por unidade (W) foi definida como igual ao diâmetro do barril, expresso em metros. Quanto à área tratada, adotou-se 0% de área permeável e 100% de área impermeável conectada ao controle LID. Os Parâmetros dos barris de chuva utilizados na modelagem no SWMM estão detalhados no **Apêndice D**.

4.5.6 Cenários de modelagem

Para a avaliação do impacto da implementação de barris de chuva no comportamento hidrológico da área de estudo, foram definidos cinco cenários distintos de modelagem utilizando o *software* SWMM. O Cenário 01 corresponde à situação de referência, sem a presença de barris de chuva. Nesse cenário, a área foi subdividida em sub-bacias representando apenas ruas, telhados e áreas vegetadas, refletindo as condições atuais do bairro de Jardim Monte Verde, localizado no município de Recife.

Os Cenários 02 a 05 incorporam diferentes volumes de barris de chuva, dimensionados conforme a metodologia descrita no item 4.4 desta dissertação. A

estimativa dos volumes foi realizada por meio de duas abordagens distintas: o método de Monte Carlo e o método de dimensionamento de Rippl. Cada abordagem gerou diferentes valores de volume armazenado, totalizando quatro configurações adicionais de barris de chuva.

Destaca-se que o dimensionamento foi realizado especificamente para a cidade do Recife, tendo em vista a localização geográfica de Jardim Monte Verde. O menor volume obtido corresponde ao cenário baseado no método de Rippl, o qual tende a fornecer soluções mais conservadoras. Por outro lado, os cenários derivados do método de Monte Carlo apresentaram volumes ligeiramente superiores, porém com valores próximos entre si.

4.5.7 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada no modelo SWMM com o objetivo de avaliar os efeitos da variação de parâmetros hidráulicos e de infiltração sobre o desempenho do reservatório do tipo “barril de chuva”. Para tal, foram consideradas as sub-bacias delimitadas no estudo de caso, adotando-se como referência o volume de reservatório que apresentou melhor eficiência nas simulações anteriores, bem como o evento de precipitação classificado como **Muito Forte**.

No que se refere aos parâmetros de infiltração, destaca-se que estes são relevantes apenas em áreas permeáveis, já que as superfícies impermeáveis não permitem a percolação da água no solo. Dessa forma, sua alteração influencia apenas a proporção entre infiltração e escoamento superficial no modelo, sem impactar diretamente a eficiência dos barris, que armazenam apenas o escoamento proveniente das coberturas.

Quanto aos parâmetros hidráulicos, foram realizadas simulações a partir da variação da altura do barril, que, por sua vez, implicou alterações em sua área, diâmetro, offset e coeficiente de fluxo. O parâmetro foi testado com variações de -50%, -37,5%, -25%, -12,5%, +12,5%, +25%, +37,5% e +50%, possibilitando avaliar de que forma o dimensionamento geométrico do reservatório influencia a entrada e a saída de água durante os eventos de chuva simulados.

5. RESULTADOS

5.1 DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIO

Para caracterizar a RMR quanto a ocorrência de chuvas, foram calculadas as médias mensais de precipitações para cada município, que podem ser observadas na Tabela 8. Os resultados indicam uma distribuição das chuvas ao longo do ano, embora a precipitação nos municípios varie significativamente.

Tabela 8 - Precipitações médias mensais da RMR

	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	Nov	dez
Abreu e Lima	100,17	94,33	190,29	299,03	325,45	301,51	264,52	144,41	68,19	31,41	57,99	66,98
Araçoiaba	128,08	106,43	211,60	215,04	248,82	268,41	197,35	97,82	56,42	15,28	42,73	50,18
Cabo de Santo Agostinho	89,66	120,85	201,42	264,75	308,57	318,85	276,93	176,13	78,59	49,88	31,54	63,22
Camaragibe	98,91	113,82	215,98	272,84	309,58	319,67	255,66	140,88	93,55	46,15	38,68	74,74
Igarassu	91,19	85,19	197,64	260,47	330,85	278,75	272,25	105,03	66,48	33,18	33,82	62,40
Ilha de Itamaracá	112,27	97,25	175,78	292,19	298,09	379,96	336,35	139,85	55,16	32,30	27,68	52,72
Ipojuca	102,26	122,87	210,29	262,79	334,84	313,43	251,37	154,84	80,74	48,72	42,51	67,35
Itapissuma	95,14	116,38	229,58	338,03	378,19	295,94	247,72	123,61	70,33	23,40	28,67	67,99
Jaboatão dos Guararapes	94,95	107,48	210,37	267,23	337,41	327,31	260,15	151,77	81,41	54,74	41,38	72,49
Moreno	84,26	83,25	156,80	189,36	245,09	240,09	182,63	102,48	67,01	41,48	28,93	69,17
Olinda	78,06	95,52	184,38	248,13	323,59	314,35	238,27	141,81	66,85	33,69	33,86	56,53
Paulista	75,15	95,94	157,80	237,64	325,04	295,14	239,66	126,55	58,05	24,59	29,62	49,12
Recife	89,35	100,51	206,28	267,30	338,59	331,94	251,55	141,03	75,64	39,72	32,37	57,37
São Lourenço da Mata	97,85	90,04	200,17	224,05	285,79	254,67	215,15	122,30	75,75	40,63	32,31	60,63

Fonte: A autora (2024).

Os volumes para a área de captação de 100 m² e uma demanda de 4,095 m³ foram calculados para todas as cidades a partir do Método de Monte Carlo associado com o Método de Rippl. No entanto, para fins comparativos foi aplicado o Método de Rippl isolado. Os volumes calculados para os reservatórios estão na Tabela 9.

Tabela 9 - Volumes calculados (m³) para os reservatórios a partir dos métodos aplicados

Municípios da Região Metropolitana do Recife	Rippl	Monte Carlo/Rippl		
		0,75	0,85	0,95
Abreu e Lima	1,5819	4,7102	5,6482	7,1613
Araçoiaba	3,6301	8,3532	10,0677	11,8944
Cabo de Santo Agostinho	1,6771	5,5447	7,2034	9,1075
Camaragibe	1,4033	4,6311	5,5819	8,6284

Municípios da Região Metropolitana do Recife	Rippl	Monte Carlo/Rippl		
		0,75	0,85	0,95
Igarassu	2,8305	7,6583	9,1054	11,4477
Ilha de Itamaracá	3,3918	7,8942	9,2453	10,6098
Ipojuca	0,8912	5,2176	6,5285	8,4060
Itapissuma	4,0243	6,9784	8,1986	9,6194
Jaboatão dos Guararapes	0,7844	4,7211	7,6698	10,4321
Moreno	2,5567	6,8322	8,8852	11,9939
Olinda	2,7861	8,6310	9,7164	11,1208
Paulista	4,0192	9,7480	10,6434	12,9343
Recife	2,4224	7,1497	8,2064	9,8555
São Lourenço da Mata	2,3550	6,9474	8,4271	10,4516

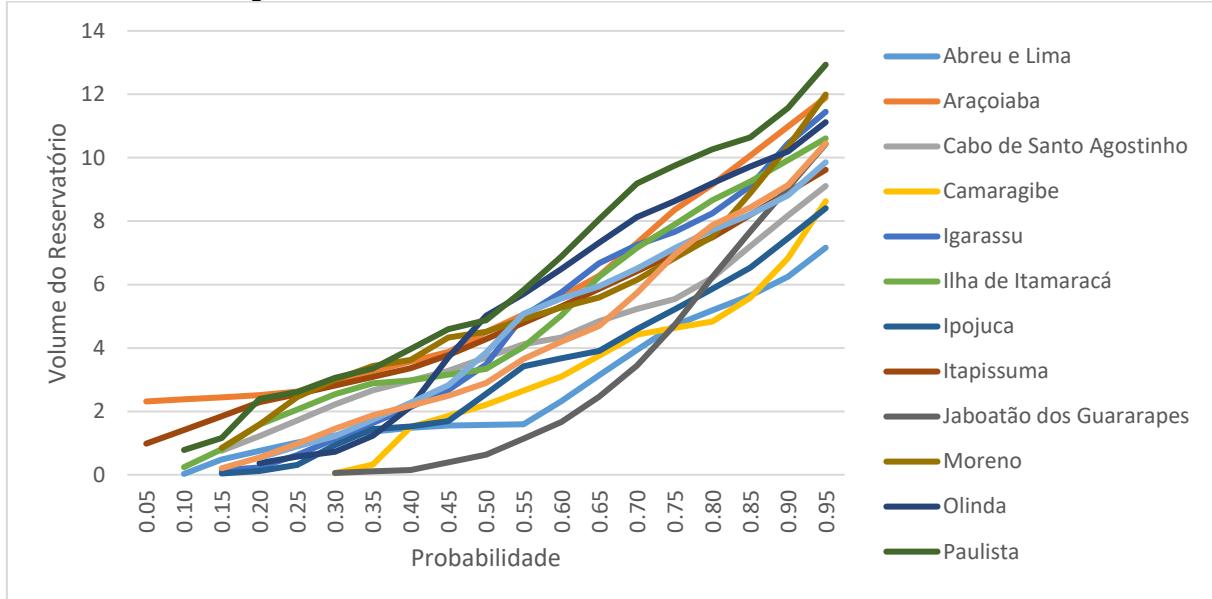
Fonte: A autora (2024).

Observa-se que o Método de Rippl isolado fornece o volume mínimo requerido para armazenamento, uma vez que utiliza as precipitações médias da série histórica. Para a implementação do Método de Monte Carlo, séries sintéticas de precipitação foram geradas para os meses de janeiro a dezembro, utilizando como base as séries históricas mensais de precipitação dos municípios da Região. Posteriormente, volumes de reservatórios foram determinados utilizando o Método de Rippl para probabilidades de ocorrência de precipitação variando de 5% a 95%.

Para precipitações com 95% de probabilidade de ocorrência, ou seja, para chuvas bastante frequentes (que representam precipitações mensais com baixo volume total), é necessário um armazenamento de água da chuva de 12,9343 m³ para o município de Paulista.

A Figura 11 apresenta as curvas das probabilidades de ocorrência de precipitação entre 5% e 95% e seus respectivos volumes para todos os municípios da RMR.

Figura 11 - Probabilidade de ocorrência x Volume do reservatório



Fonte: A autora (2024).

5.2 MODELAGEM

A modelagem foi realizada com base nos dados inseridos no SWMM, que incluíram a caracterização das sub-bacias da área de estudo, a definição dos parâmetros dos barris de chuva e a seleção dos eventos de precipitação. As representações gráficas dos eventos pluviométricos utilizados encontram-se no **Apêndice E**.

A partir dos volumes de reservatórios previamente dimensionados, foram elaborados diferentes cenários para simular o comportamento do escoamento superficial sob variadas condições de armazenamento de água de chuva. A caracterização detalhada desses cenários é apresentada no Quadro 3 a seguir.

Quadro 3 - Caracterização dos cenários estudados.

Cenário	Descrição
Cenário 01	Cenário de referência, sem a utilização de barris de chuva.
Cenário 02	Implantação de barris de chuva com volume de 2,5 m ³ .
Cenário 03	Implantação de barris de chuva com volume de 7,5 m ³ .
Cenário 04	Implantação de barris de chuva com volume de 8,5 m ³ .
Cenário 05	Implantação de barris de chuva com volume de 10 m ³ .

Fonte: A autora (2025).

O escoamento superficial no cenário de referência foi calculado por meio da modelagem no SWMM, considerando as condições da área sem a implantação de barris de chuva. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Volume de escoamento no cenário de referência (Cenário 01).

Evento	Data	Precipitação	Infiltração	Escoamento Superficial	Drenagem LID	Escoamento TOTAL
01	05/03/2022	5,110	1,341	3,140	0,000	3,140
02	05/03/2022	36,460	5,736	30,943	0,000	30,943
03	06/03/2022	54,160	6,974	47,457	0,000	47,457
04	22/03/2022	23,950	5,768	18,512	0,000	18,512
05	22/03/2022	40,740	5,777	34,939	0,000	34,939
06	30/03/2022	15,690	3,714	12,261	0,000	12,261
07	03/04/2022	26,860	5,180	21,623	0,000	21,623
08	24/04/2022	9,260	2,430	6,805	0,000	6,805
09	25/05/2022	30,910	7,992	22,341	0,000	22,341
10	25/05/2022	43,850	7,962	35,577	0,000	35,577
11	28/05/2022	200,030	11,227	189,354	0,000	189,354
12	07/06/2022	62,250	9,402	52,937	0,000	52,937
13	22/06/2022	59,510	6,297	52,939	0,000	52,939
14	29/06/2022	12,190	3,199	8,364	0,000	8,364

Fonte: A autora (2025).

Os resultados indicam que, na ausência de medidas de controle LID, não há redução no escoamento superficial. No Cenário 02 observa-se uma diminuição no volume escoado em relação ao Cenário 01, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Volume e percentual de redução do escoamento no Cenário 02.

Evento	Precipitação	Infiltração	Escoamento Superficial	Drenagem LID	Escoamento TOTAL	Redução de escoamento
01	5,110	1,341	0,311	0,000	0,311	90,096%
02	36,460	5,736	11,129	3,326	14,455	53,285%
03	54,160	6,974	24,317	6,502	30,819	35,059%
04	23,950	5,768	2,302	0,000	2,302	87,565%
05	40,740	5,777	16,445	1,973	18,418	47,285%
06	15,690	3,714	1,596	0,000	1,596	86,983%
07	26,860	5,180	4,114	1,107	5,221	75,854%
08	9,260	2,430	0,661	0,000	0,661	90,287%
09	30,910	7,992	2,339	3,571	5,910	73,546%
10	43,850	7,962	9,953	9,083	19,036	46,494%
11	200,030	11,227	145,820	25,683	171,503	9,427%
12	62,250	9,402	27,033	9,204	36,237	31,547%
13	59,510	6,297	29,583	6,684	36,267	31,493%
14	12,190	3,199	0,833	0,000	0,833	90,041%

Fonte: A autora (2025).

As Tabelas 12, 13 e 14 apresentam, respectivamente, os resultados da redução do escoamento com a utilização de barris de 7,5 m³, 8,5 m³ e 10 m³ em relação ao cenário de referência.

Tabela 12 - Volume e percentual de redução do escoamento no Cenário 03.

Evento	Precipitação	Infiltração	Escoamento Superficial	Drenagem LID	Escoamento TOTAL	Redução de escoamento
01	5,110	1,341	0,311	0,000	0,311	90,096%
02	36,460	5,736	6,600	0,000	6,600	78,670%
03	54,160	6,974	11,357	0,000	11,357	76,069%
04	23,950	5,768	2,302	0,000	2,302	87,565%
05	40,740	5,777	7,978	0,000	7,978	77,166%
06	15,690	3,714	1,596	0,000	1,596	86,983%
07	26,860	5,180	3,868	0,000	3,868	82,112%
08	9,260	2,430	0,661	0,000	0,661	90,287%
09	30,910	7,992	2,338	0,000	2,338	89,535%
10	43,850	7,962	6,758	0,000	6,758	81,005%
11	200,030	11,227	108,379	27,423	135,802	28,281%
12	62,250	9,402	11,583	0,000	11,583	78,119%
13	59,510	6,297	13,782	0,000	13,782	73,966%
14	12,190	3,199	0,833	0,000	0,833	90,041%

Fonte: A autora (2025).

Tabela 13 - Volume e percentual de redução do escoamento no Cenário 04.

Evento	Precipitação	Infiltração	Escoamento Superficial	Drenagem LID	Escoamento TOTAL	Redução de escoamento
01	5,110	1,341	0,311	0,000	0,311	90,096%
02	36,460	5,736	6,600	0,000	6,600	78,670%
03	54,160	6,974	11,357	0,000	11,357	76,069%
04	23,950	5,768	2,302	0,000	2,302	87,565%
05	40,740	5,777	7,978	0,000	7,978	77,166%
06	15,690	3,714	1,596	0,000	1,596	86,983%
07	26,860	5,180	3,868	0,000	3,868	82,112%
08	9,260	2,430	0,661	0,000	0,661	90,287%
09	30,910	7,992	2,338	0,000	2,338	89,535%
10	43,850	7,962	6,758	0,000	6,758	81,005%
11	200,030	11,227	105,274	23,388	128,662	32,052%
12	62,250	9,402	11,583	0,000	11,583	78,119%
13	59,510	6,297	13,782	0,000	13,782	73,966%
14	12,190	3,199	0,833	0,000	0,833	90,041%

Fonte: A autora (2025).

Tabela 14 - Volume e percentual de redução do escoamento no Cenário 05.

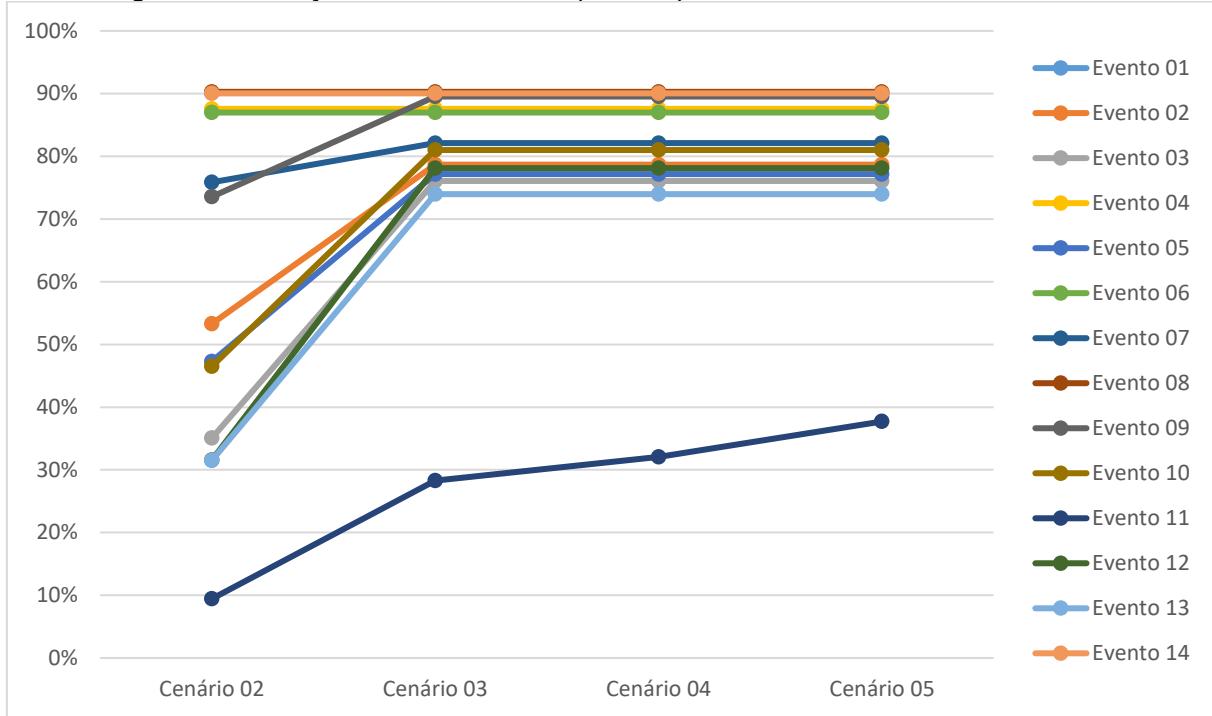
Evento	Precipitação	Infiltração	Escoamento Superficial	Drenagem LID	Escoamento TOTAL	Redução de escoamento
01	5,110	1,341	0,311	0,000	0,311	90,096%
02	36,460	5,736	6,600	0,000	6,600	78,670%
03	54,160	6,974	11,357	0,000	11,357	76,069%
04	23,950	5,768	2,302	0,000	2,302	87,565%
05	40,740	5,777	7,978	0,000	7,978	77,166%
06	15,690	3,714	1,596	0,000	1,596	86,983%
07	26,860	5,180	3,868	0,000	3,868	82,112%
08	9,260	2,430	0,661	0,000	0,661	90,287%
09	30,910	7,992	2,338	0,000	2,338	89,535%
10	43,850	7,962	6,758	0,000	6,758	81,005%
11	200,030	11,227	96,109	21,842	117,951	37,709%
12	62,250	9,402	11,583	0,000	11,583	78,119%
13	59,510	6,297	13,782	0,000	13,782	73,966%
14	12,190	3,199	0,833	0,000	0,833	90,041%

Fonte: A autora (2025).

A análise dos resultados demonstrou que os eventos 01, 04, 06, 08 e 14 apresentaram a redução máxima do escoamento já no Cenário 02, correspondente ao menor volume de reservatório ($2,5 \text{ m}^3$), o que indica que esse volume foi suficiente para controlar o escoamento nesses casos. É importante destacar que todos esses eventos registraram precipitações inferiores a 25 mm. No total, 245 dos 262 eventos analisados apresentaram precipitação abaixo desse valor.

Por outro lado, os eventos 02, 03, 05, 07, 09, 10, 12 e 13 atingiram a redução máxima no cenário com reservatórios de $7,5 \text{ m}^3$, sendo que, para os volumes de $8,5 \text{ m}^3$ e 10 m^3 , os resultados permaneceram inalterados. Embora exista uma pequena diferença entre esses volumes, o impacto sobre a redução do escoamento se mostrou insignificante, resultando em valores iguais nos três cenários de maior capacidade. Apenas o evento 11, caracterizado pela maior precipitação entre os analisados, apresentou uma redução gradativa, com melhora progressiva conforme o aumento do volume dos reservatórios. A redução do escoamento superficial para os 11 eventos de precipitação em cada cenário estudado pode ser observada na Figura 12.

Figura 12 - Redução do escoamento superficial para os 11 eventos em cada cenário.



Fonte: A autora (2025).

Além da análise do volume de escoamento, também foi realizada a avaliação das vazões de pico, com o objetivo de verificar a eficácia dos diferentes cenários na redução das vazões máximas. Essa análise é fundamental para entender o potencial dos reservatórios em mitigar os impactos das cheias durante eventos de chuva intensa.

A Tabela 15 apresenta os valores das vazões máximas simuladas para o cenário de referência (sem controle LID) e para o Cenário 02 (reservatórios de 2,5 m³), bem como a respectiva redução observada entre os dois cenários.

Tabela 15 - Percentual de redução da vazão de pico comparando o Cenário 02 com o Cenário 01.

Evento	Precipitação	Cenário de Referência	Cenário com barril de 2,5 m ³	Redução
		Vazão Máxima	Vazão Máxima	
01	5,110	805,07	69,54	91,362%
02	36,460	14934,93	7438,29	50,195%
03	54,160	17602,11	11572,19	34,257%
04	23,950	7741,31	950,26	87,725%
05	40,740	18476,78	12670,30	31,426%
06	15,690	11737,84	1436,27	87,764%
07	26,860	11412,24	1608,29	85,907%
08	9,260	5914,66	550,67	90,690%
09	30,910	3974,50	824,71	79,250%
10	43,850	8413,79	2118,02	74,827%

Evento	Precipitação	Cenário de Referência	Cenário com barril de 2,5 m³	
		Vazão Máxima	Vazão Máxima	Redução
11	200,030	22634,43	22429,50	0,905%
12	62,250	12647,72	12518,89	1,019%
13	59,510	20346,63	19084,07	6,205%
14	12,190	1262,00	114,16	90,954%

Fonte: A autora (2025).

A análise dos dados apresentados na Tabela 15 evidencia que a redução do volume de escoamento superficial está diretamente relacionada à diminuição da vazão de pico, uma vez que, ao controlar melhor a quantidade de água que escoa, os reservatórios conseguem reduzir a intensidade máxima do fluxo durante os eventos de chuva. Além disso, o dimensionamento inicial do reservatório mostrou-se suficiente para impactar significativamente o pico de escoamento na maioria dos eventos analisados.

Esse comportamento consistente reforça a hipótese de que, para determinados eventos, volumes menores são eficazes e mantêm seu desempenho mesmo quando a capacidade é aumentada, não havendo ganhos adicionais significativos com a ampliação. Em contrapartida, os eventos 11, 12 e 13 apresentaram eficácia limitada no Cenário 02, com reduções pouco expressivas na vazão de pico. Esse resultado sugere que a capacidade inicial dos reservatórios é insuficiente para controlar escoamentos mais intensos, sendo necessário adotar volumes maiores para uma atuação mais eficiente.

As Tabelas 16, 17 e 18 apresentam os resultados da redução da vazão de pico nos Cenários 03, 04 e 05, respectivamente.

Tabela 16 - Percentual de redução da vazão máxima comparando o Cenário 03 com o Cenário 01.

Evento	Precipitação	Cenário de Referência	Cenário com barril de 7,5 m³	
		Vazão Máxima	Vazão Máxima	Redução
01	5,110	805,07	69,54	91,362%
02	36,460	14934,93	2845,46	80,948%
03	54,160	17602,11	2157,95	87,740%
04	23,950	7741,31	950,26	87,725%
05	40,740	18476,78	3636,30	80,320%
06	15,690	11737,84	1436,27	87,764%
07	26,860	11412,24	1273,82	88,838%
08	9,260	5914,66	550,67	90,690%
09	30,910	3974,50	356,14	91,039%
10	43,850	8413,79	869,76	89,663%
11	200,030	22634,43	22018,59	2,721%

Evento	Precipitação	Cenário de Referência	Cenário com barril de 7,5 m³	
		Vazão Máxima	Vazão Máxima	Redução
12	62,250	12647,72	1907,99	84,914%
13	59,510	20346,63	4937,39	75,734%
14	12,190	1262,00	114,16	90,954%

Fonte: A autora (2025).

Tabela 17 - Percentual de redução da vazão máxima comparando o Cenário 04 com o Cenário 01.

Evento	Precipitação	Cenário de Referência	Cenário com barril de 8,5 m³	
		Vazão Máxima	Vazão Máxima	Redução
01	5,110	805,07	69,54	91,362%
02	36,460	14934,93	2845,46	80,948%
03	54,160	17602,11	2157,95	87,740%
04	23,950	7741,31	950,26	87,725%
05	40,740	18476,78	3636,30	80,320%
06	15,690	11737,84	1436,27	87,764%
07	26,860	11412,24	1273,82	88,838%
08	9,260	5914,66	550,67	90,690%
09	30,910	3974,50	356,14	91,039%
10	43,850	8413,79	869,76	89,663%
11	200,030	22634,43	21936,24	3,085%
12	62,250	12647,72	1907,99	84,914%
13	59,510	20346,63	4937,39	75,734%
14	12,190	1262,00	114,16	90,954%

Fonte: A autora (2025).

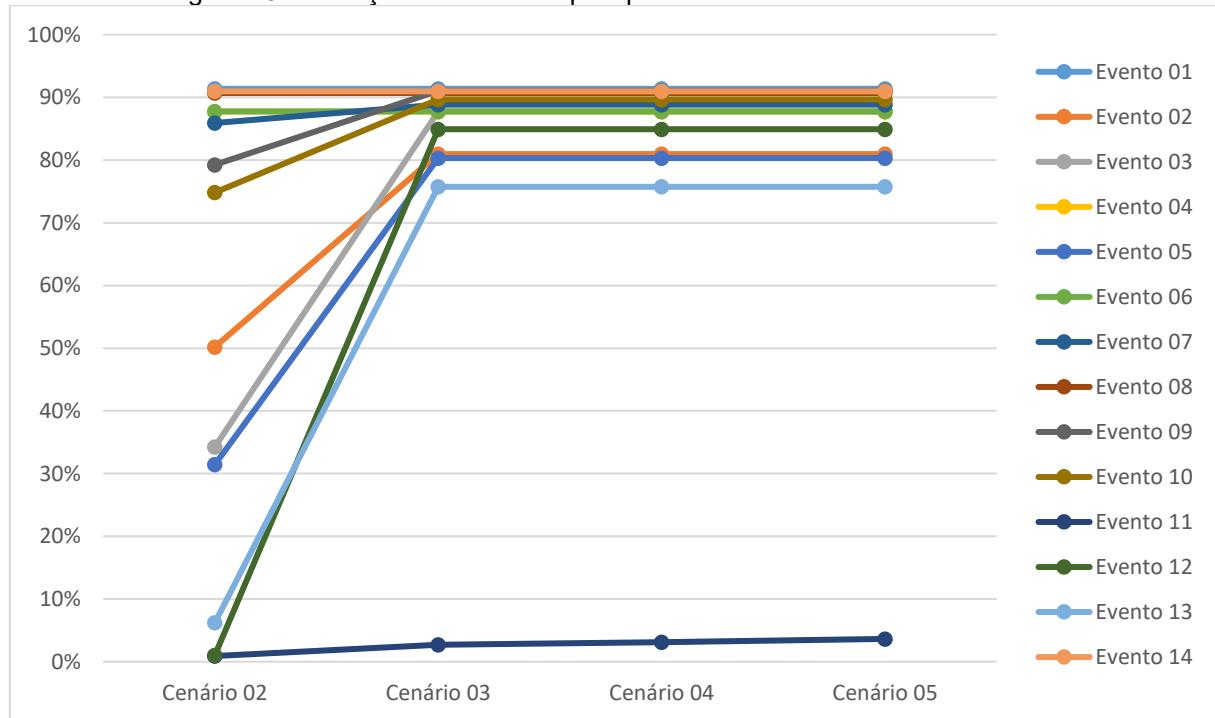
Tabela 18 - Percentual de redução da vazão máxima comparando o Cenário 05 com o Cenário 01.

Evento	Precipitação	Cenário de Referência	Cenário com barril de 10 m³	
		Vazão Máxima	Vazão Máxima	Redução
01	5,110	805,07	69,54	91,362%
02	36,460	14934,93	2845,46	80,948%
03	54,160	17602,11	2157,95	87,740%
04	23,950	7741,31	950,26	87,725%
05	40,740	18476,78	3636,30	80,320%
06	15,690	11737,84	1436,27	87,764%
07	26,860	11412,24	1273,82	88,838%
08	9,260	5914,66	550,67	90,690%
09	30,910	3974,50	356,14	91,039%
10	43,850	8413,79	869,76	89,663%
11	200,030	22634,43	21812,61	3,631%
12	62,250	12647,72	1907,99	84,914%
13	59,510	20346,63	4937,39	75,734%
14	12,190	1262,00	114,16	90,954%

Fonte: A autora (2025).

Para os eventos 02, 03, 05, 07, 09, 10, 12 e 13, observou-se uma tendência de estabilização dos resultados nos cenários com volumes maiores ($7,5\text{ m}^3$, $8,5\text{ m}^3$ e 10 m^3). Esses resultados reforçam a importância de avaliar o desempenho dos reservatórios em diferentes capacidades, já que até mesmo volumes de reservatório reduzidos podem oferecer benefícios significativos no controle do escoamento superficial e na mitigação de enchentes urbanas. A redução da vazão de pico em cada evento para cada cenário está apresentada na Figura 13.

Figura 13 - Redução da vazão de pico para os 11 eventos em cada cenário.



Fonte: A autora (2025).

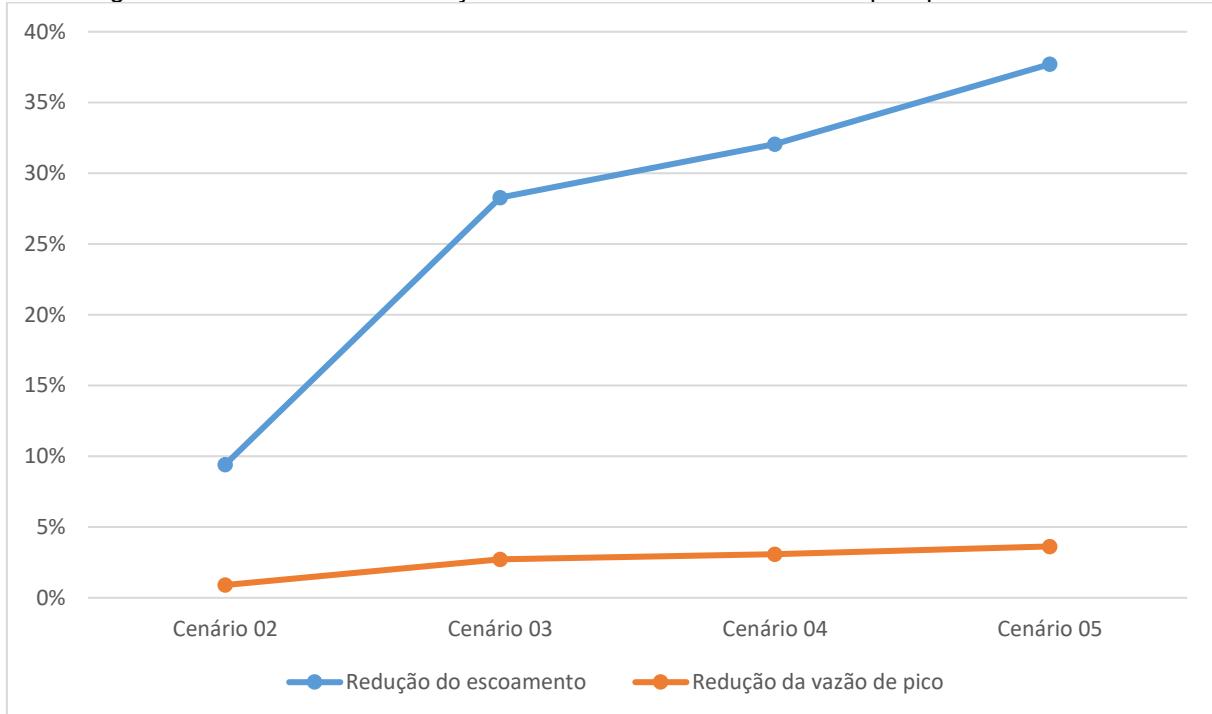
Por fim, destaca-se o evento 11, que apresentou a menor redução de vazão de pico, o que pode ser atribuído ao volume elevado da precipitação associada a esse evento, exigindo maior capacidade de controle para resultados mais eficazes. Na Tabela 19Tabela 19 apresenta a síntese dos resultados obtidos nos cenários com diferentes volumes de barris de chuva para o evento 11, caracterizado pela maior precipitação registrada no período observado (março a junho de 2022) e na Figura 14 está representado esse resultado.

Tabela 19 - Síntese dos efeitos do barril de chuva na redução do escoamento e da vazão de pico – Evento 11 (200,030 mm)

Cenário	Redução do escoamento	Redução da vazão de pico
Cenário 02	9,427%	0,905%
Cenário 03	28,281%	2,721%
Cenário 04	32,052%	3,085%
Cenário 05	37,709%	3,631%

Fonte: A autora (2025).

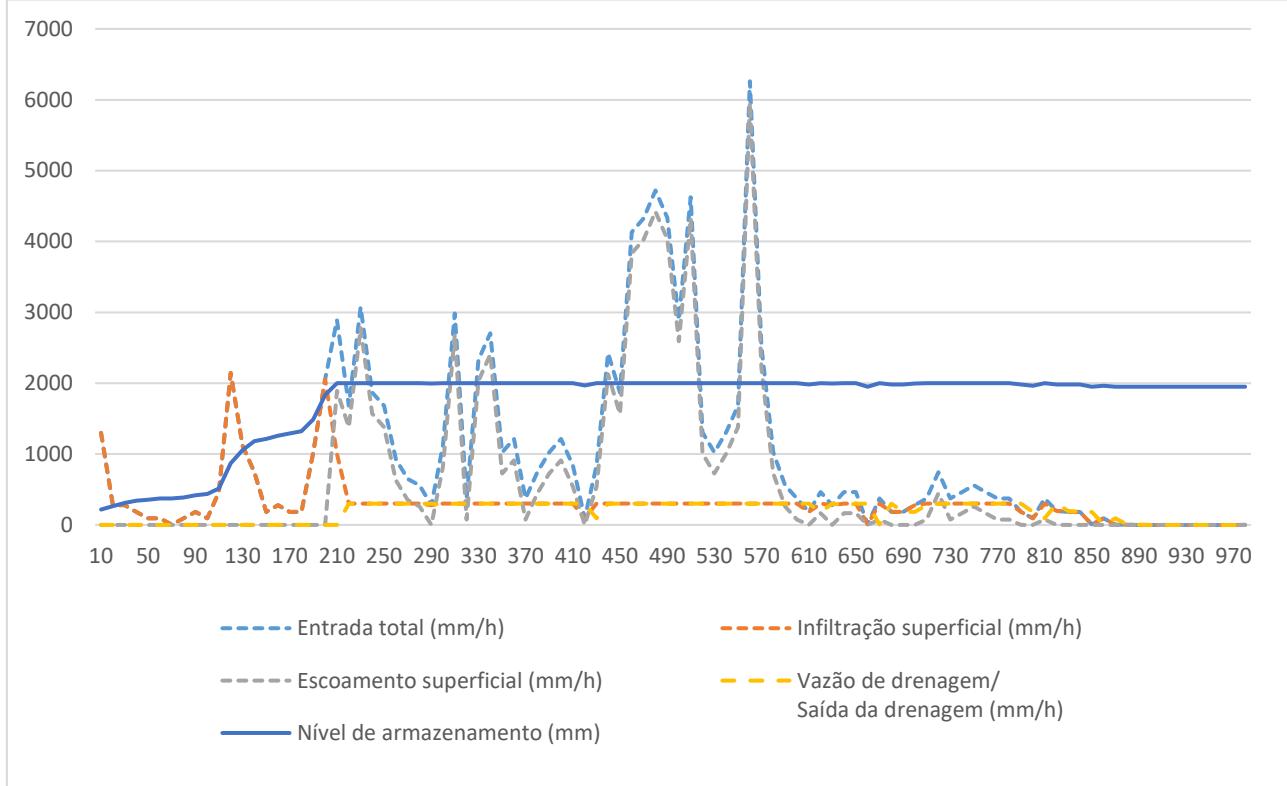
Figura 14 - Resultados da redução do escoamento e da vazão de pico para o Evento 11.



Fonte: A autora (2025).

O Evento 11 (200,03 mm) foi selecionado para uma análise mais aprofundada com o objetivo de avaliar o desempenho dos controles LID em condições críticas, considerando que os eventos de baixa e moderada intensidade já demonstraram a eficácia do sistema em cenários mais frequentes e menos extremos. Nesta etapa, buscou-se compreender o comportamento do barril de chuva frente a um evento extremo, analisando variáveis como volume de entrada, infiltração, escoamento superficial, vazão de drenagem e nível de armazenamento. Esses aspectos são apresentados nas Figuras 15, 16, 17 e 18, correspondentes aos Cenários 02, 03, 04 e 05, respectivamente.

Figura 15 - Comportamento hidrológico do barril de chuva no Cenário 02 para o Evento 11.



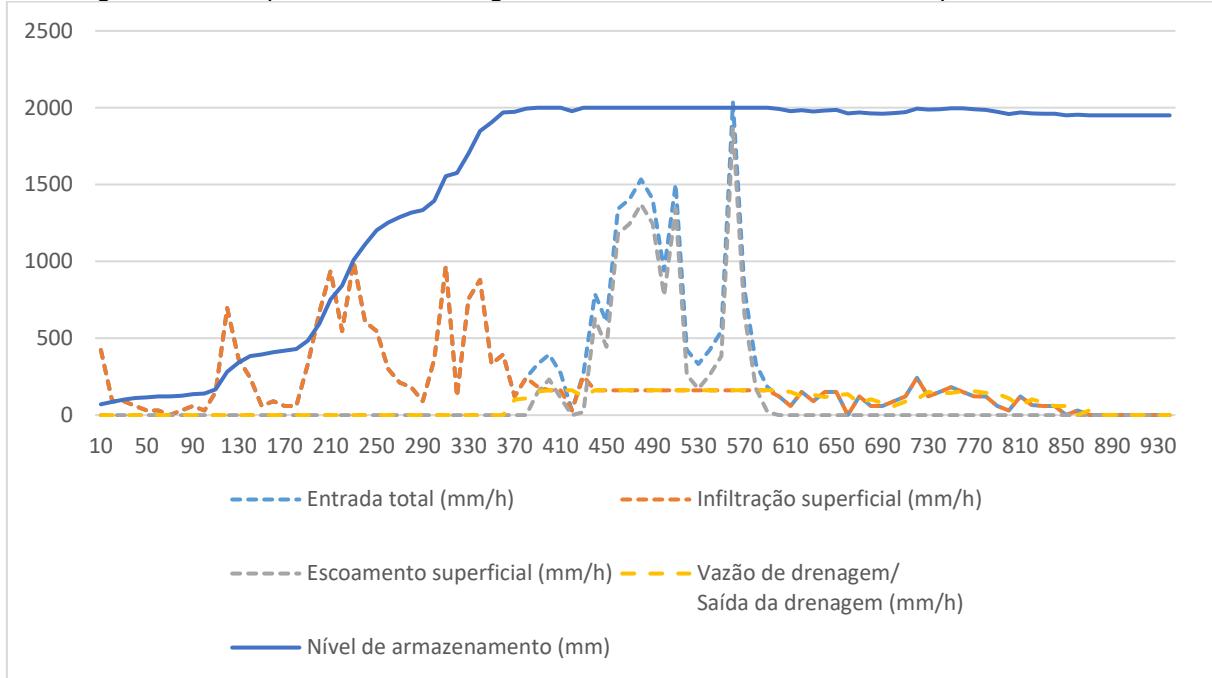
Fonte: A autora (2025).

Na Figura 15, observa-se que a entrada total de água (linha azul tracejada) se mantém alta ao longo do tempo, refletindo a severidade do evento. O nível de armazenamento (linha azul contínua) atinge rapidamente sua capacidade máxima e permanece constante por um longo período, indicando a saturação precoce do reservatório.

A infiltração superficial (linha laranja tracejada) apresenta picos apenas nos instantes iniciais, sugerindo que o solo absorveu água até atingir sua capacidade de saturação, deixando de contribuir significativamente para a mitigação do escoamento. Com o sistema saturado, o escoamento superficial (linha cinza tracejada) e a vazão ou saída da drenagem (linha amarela tracejada) tornam-se predominantes, com picos que coincidem com os períodos de maior entrada de água.

Esses resultados evidenciam que, no Cenário 02, o volume do reservatório foi insuficiente para conter os impactos de um evento extremo como o Evento 11. O rápido preenchimento, aliado aos elevados volumes de escoamento e vazão de drenagem, reforça a necessidade de reservatórios com maior capacidade para melhorar a eficiência dos controles LID em condições críticas.

Figura 16 - Comportamento hidrológico do barril de chuva no Cenário 03 para o Evento 11.



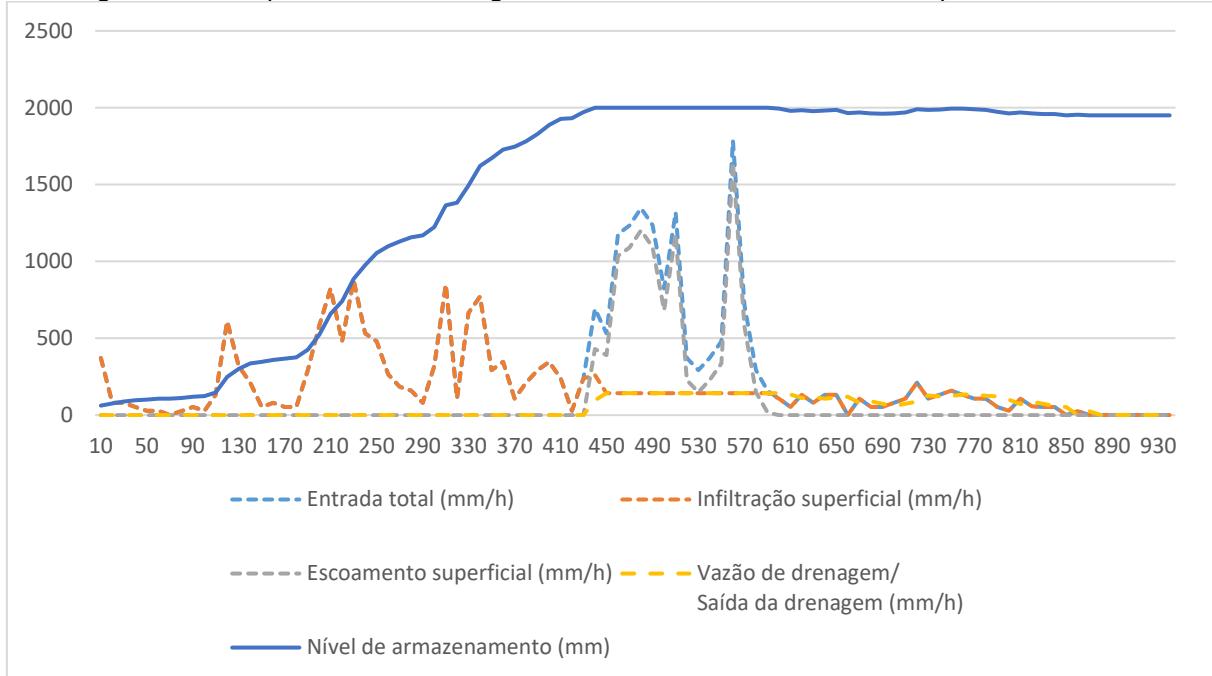
Fonte: A autora (2025).

Neste cenário, observa-se um desempenho significativamente superior do sistema de controle LID em comparação ao Cenário 02. A curva da entrada total reflete a intensidade da precipitação, enquanto o nível de armazenamento atinge a capacidade máxima de forma mais tardia, indicando que o reservatório reteve água por mais tempo. Após o pico, nota-se uma leve redução no nível, sugerindo escoamento ou infiltração da água.

A infiltração superficial é mais distribuída ao longo do evento, demonstrando maior absorção pelo solo. O escoamento superficial e seus picos são reduzidos em comparação ao Cenário 02, o que evidencia maior eficácia no controle do fluxo excedente. A vazão de drenagem apresenta padrão mais estável, indicando modulação eficiente da saída de água.

De modo geral, o Cenário 03 demonstrou maior capacidade de mitigar os efeitos do Evento 11, com redução do escoamento e regulação mais eficiente da drenagem, reforçando a importância de volumes de reservatório mais elevados em eventos extremos.

Figura 17 - Comportamento hidrológico do barril de chuva no Cenário 04 para o Evento 11.



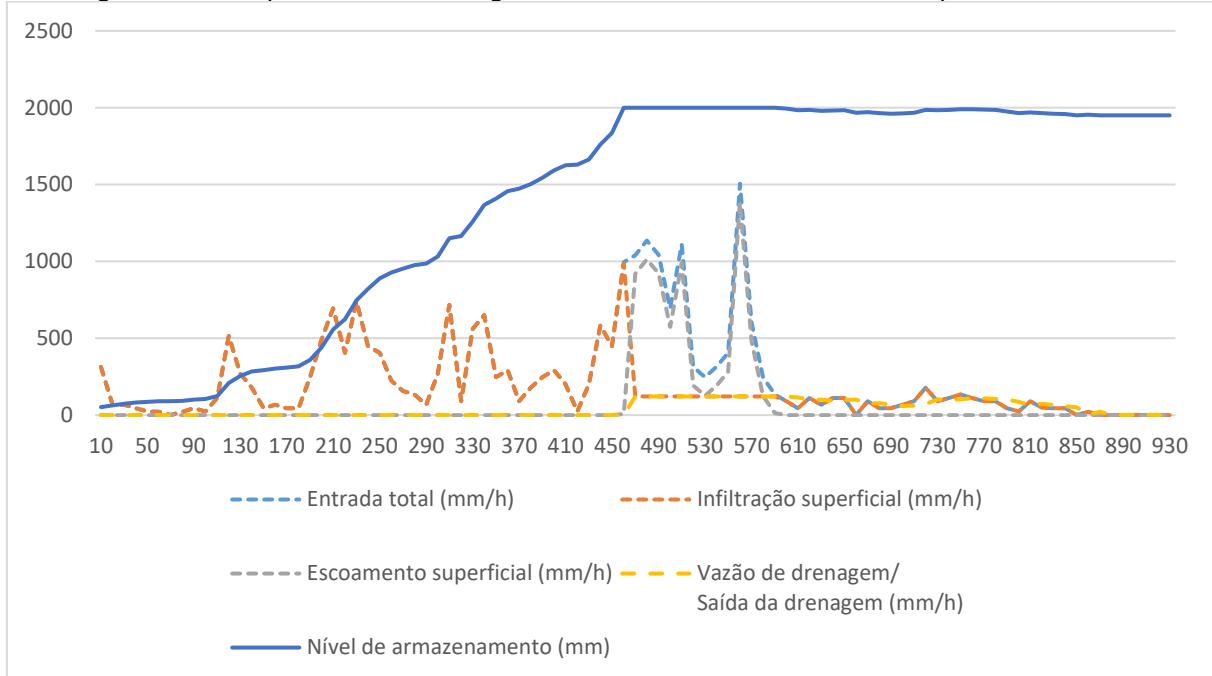
Fonte: A autora (2025).

Este cenário mantém a tendência observada no Cenário 03, com desempenho estável frente ao evento extremo. A entrada total segue o mesmo padrão, enquanto o nível de armazenamento atinge rapidamente sua capacidade, com estabilização próxima do volume máximo.

A infiltração superficial manteve uma contribuição relevante, especialmente no início do evento, contribuindo para a redução do volume que escoaria pela superfície. O escoamento superficial apresenta picos ainda mais baixos e menos frequentes, indicando melhor retenção. A vazão de drenagem segue estável, com liberação controlada da água.

O Cenário 04 demonstrou desempenho consistente no controle do Evento 11. A melhora em relação ao cenário anterior foi discreta, sugerindo que volumes entre 7,5 m³ e 8,5 m³ já são adequados para enfrentar eventos dessa magnitude. A infiltração, o controle do escoamento e a regulação da drenagem permaneceram equilibrados, mostrando que o aumento da capacidade continua a trazer benefícios, embora com ganhos pouco expressivos.

Figura 18 - Comportamento hidrológico do barril de chuva no Cenário 05 para o Evento 11.



Fonte: A autora (2025).

No último cenário analisado, o sistema de armazenamento atinge seu desempenho máximo, ainda que os ganhos adicionais em relação ao cenário anterior sejam mínimos. A entrada total permanece elevada, e o nível de armazenamento atinge rapidamente sua capacidade máxima, mantendo-se estável por longo período.

A infiltração superficial continua a contribuir, especialmente nas fases iniciais e intermediárias, auxiliando na redução do volume direcionado ao escoamento. O escoamento superficial apresenta leve redução em relação ao Cenário 04, com picos discretos. A vazão de drenagem segue comportamento controlado, sem oscilações significativas.

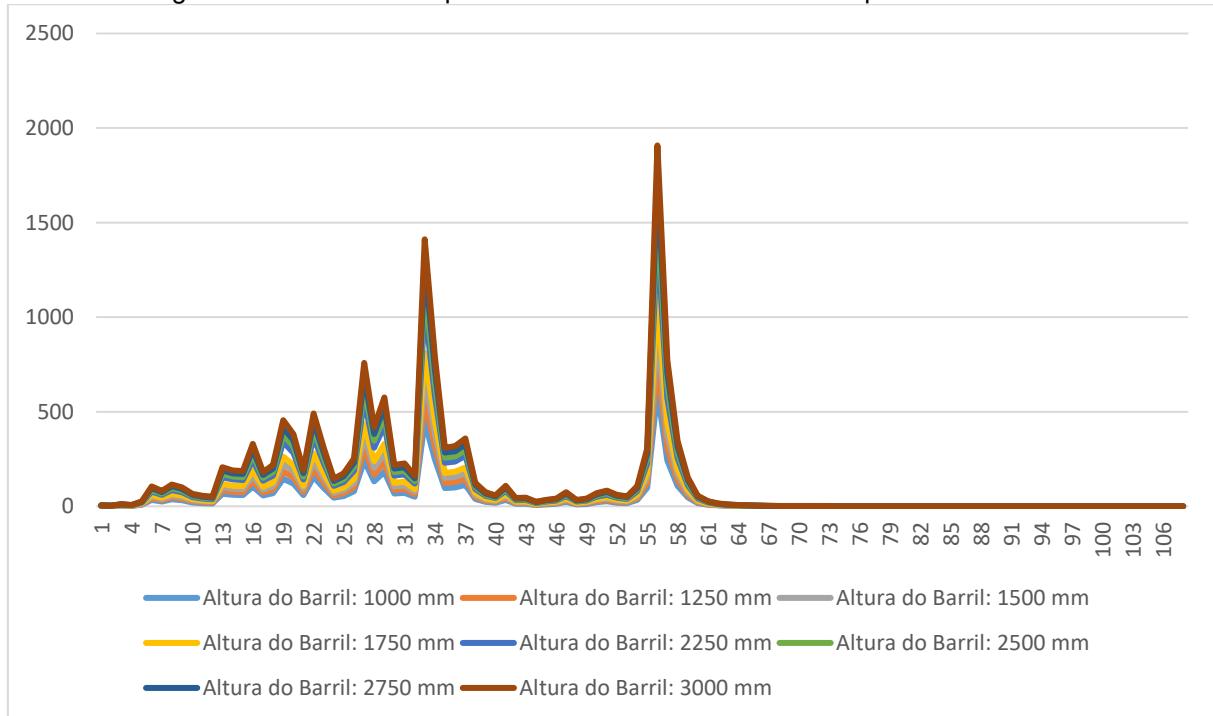
Assim, o Cenário 05 confirma a eficiência do sistema LID em condições extremas. O desempenho foi semelhante ao do Cenário 04, com ganhos de baixo impacto ao elevar o volume para 10 m³. Isso indica que volumes entre 8,5 m³ e 10 m³ são suficientes para mitigar os efeitos de eventos intensos, com boa capacidade de infiltração superficial, controle do escoamento e drenagem gradual. A aproximação entre os resultados dos cenários aponta para um ponto de equilíbrio no dimensionamento do sistema.

Os resultados da análise de sensibilidade, considerando o volume de 7,5 m³ e o Evento 12 (62,25mm), mostraram que a variação dos parâmetros de infiltração não altera a eficiência do barril de chuva. Embora tais parâmetros modifiquem o balanço

entre infiltração e escoamento superficial, o volume captado pelos reservatórios permanece constante, já que a captação está restrita ao escoamento proveniente das coberturas. Assim, a redução ou ampliação do escoamento está relacionada apenas às características do solo, sem interferir no desempenho do barril.

Em contraste, a variação dos parâmetros hidráulicos teve impacto direto no volume armazenado. O aumento da altura do barril ampliou a área e o diâmetro, favorecendo maior entrada de água ao longo do tempo, conforme pode ser observado no Figura 19. No entanto, não houve diferença no volume de escoamento, pois em nenhuma simulação ocorreu saída pelo dreno. Isso ocorreu porque a altura do dreno não foi mantida fixa durante as alterações geométricas, o que resultou no armazenamento integral da água captada no evento analisado.

Figura 19 - Entrada total para cada barril com altura variada para o Evento 12.



Fonte: A autora (2025).

Em síntese, os resultados indicam que a eficiência do barril depende diretamente de suas características geométricas, enquanto as condições de infiltração do solo afetam apenas o comportamento hidrológico da bacia, sem modificar sua capacidade de retenção.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou o impacto do uso de reservatórios do tipo “barril de chuva” na mitigação do escoamento superficial em áreas urbanas da RMR, por meio do dimensionamento de volumes de armazenamento e da modelagem hidrológica com o *software* SWMM.

Os reservatórios foram dimensionados com base nas médias mensais de precipitação dos municípios da RMR, utilizando os métodos de Monte Carlo e Rippl. Os resultados revelaram uma ampla variabilidade nos volumes calculados, refletindo as diferenças espaciais de precipitação na região. A comparação entre os métodos mostrou que o Rippl, baseado em médias históricas, tende a subdimensionar os volumes, enquanto o Monte Carlo, ao incorporar variabilidade climática, fornece estimativas mais robustas e seguras para o planejamento.

A modelagem realizada para a região de Jardim Monte Verde demonstrou que os barris de chuva são eficazes na redução do volume escoado e das vazões de pico. Volumes modestos, como 2,5 m³, foram suficientes para controlar chuvas de baixa intensidade, as mais frequentes nos cenários analisados. Para eventos mais intensos, volumes entre 7,5 m³ e 10 m³ mostraram maior capacidade de mitigação, embora os ganhos adicionais diminuam com o aumento do volume, indicando um ponto de eficiência limite.

Mesmo diante de eventos extremos, como o Evento 11 (200 mm), reservatórios com capacidade entre 8,5 m³ e 10 m³ apresentaram desempenho relevante na atenuação do escoamento. Esses resultados reforçam a importância de um dimensionamento adequado, alinhado à frequência e intensidade das chuvas locais.

Em síntese, a pesquisa demonstra que o uso de reservatórios de retenção, quando adequadamente dimensionados, constitui uma estratégia eficaz para o manejo sustentável das águas pluviais na RMR. Essa abordagem contribui significativamente para a mitigação dos impactos de eventos chuvosos, desde a redução de alagamentos em áreas urbanas até a prevenção de deslizamentos de terra em regiões de morro.

É importante salientar que os resultados deste estudo estão condicionados aos parâmetros e pressupostos adotados na construção do modelo no SWMM, sobretudo no que se refere à representação das estruturas de baixo impacto, cuja reprodução do comportamento hidrológico apresenta limitações no software. Assim, embora

tenham sido considerados diferentes cenários dentro do recorte analisado, ainda se faz necessário o desenvolvimento de investigações complementares que possam confirmar ou refinar os achados obtidos.

6.1 LIMITAÇÕES ENCONTRADAS

Embora o modelo SWMM seja amplamente utilizado internacionalmente na análise de cenários hidrológicos e de drenagem urbana, sua aplicação no Brasil ainda enfrenta limitações significativas, principalmente devido à escassez de conhecimento técnico e à falta de profissionais especializados. Essa limitação pode restringir a disseminação e replicação de estudos semelhantes em outras regiões. Ainda assim, este trabalho valida o uso do SWMM como uma ferramenta eficaz para a geração de informações que subsidiam o planejamento urbano em bacias hidrográficas, apresentando resultados consistentes e alinhados com os objetivos propostos.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros que visem aprofundar o entendimento e a aplicação prática dos sistemas de aproveitamento de água de chuva, recomenda-se:

- Utilização de curvas de controle: A adoção de curvas de controle na operação dos reservatórios representa uma estratégia promissora para otimizar a gestão dos volumes armazenados. Com base em regras operacionais predefinidas, essas curvas permitem decisões dinâmicas sobre retenção, liberação ou uso da água, ajustando o comportamento do sistema conforme a evolução das condições meteorológicas. Essa abordagem é particularmente eficaz em cenários com eventos pluviais sucessivos ou de longa duração, nos quais a liberação controlada pode evitar a saturação antecipada do reservatório, aumentando a resiliência do sistema frente a eventos extremos.
- Avaliação econômica: A incorporação de análises de custo-benefício para diferentes volumes de reservatórios pode oferecer subsídios valiosos à formulação de políticas públicas e ao planejamento de projetos de infraestrutura urbana. Essa avaliação permite comparar o investimento necessário com os benefícios obtidos na redução de alagamentos, preservação

de infraestruturas e melhoria da qualidade de vida urbana, contribuindo para decisões mais eficientes e sustentáveis.

- Integração com outros controles LID: Estudos futuros podem explorar a sinergia entre os barris de chuva e outras práticas de infraestrutura verde, como pavimentos permeáveis, telhados verdes e jardins de chuva. A análise integrada de diferentes LID pode evidenciar ganhos adicionais em eficiência hidráulica, qualidade da água e amenização térmica, fortalecendo a abordagem de desenvolvimento urbano sustentável.
- Aplicação em escala de bacia hidrográfica: Expandir a modelagem para a escala de bacia hidrográfica permitirá avaliar os efeitos acumulados da adoção dos barris de chuva em áreas mais amplas e interconectadas. Essa abordagem contribui para uma visão sistêmica da gestão das águas pluviais, identificando o potencial de mitigação em nível regional e orientando estratégias integradas de planejamento urbano e ambiental.
- Análise de cenários futuros de mudança climática: A simulação do desempenho dos reservatórios sob diferentes cenários de mudança climática é fundamental para antecipar os desafios impostos pelas alterações nos regimes de precipitação. Essa análise pode apoiar a formulação de políticas adaptativas, garantindo que os sistemas de retenção continuem eficazes diante de eventos extremos mais frequentes e intensos, promovendo maior resiliência urbana.

REFERÊNCIAS

- ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte.** 2005. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- ALENCAR, S. G.; CRUZ NETO, M. M.; SANDRIN, G. M.; CAMPOS, C. A. B. **Técnicas compensatórias de drenagem urbana para manejo de águas pluviais: revisão sistemática e análise comparativa de métodos convencionais e inovadores no estado de Mato Grosso.** 2022. In: XIV ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS, 14., 2022, Brasília. Anais [...]. Brasília, DF: ABRHidro, 2022. 13 p. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=13897>.
- ALHEIROS, M. M.; LIMA FILHO, M. F.; MONTEIRO, F. A. J.; OLIVEIRA FILHO, J. S. **Sistemas deposicionais na Formação Barreiras no Nordeste Oriental.** 1988. n: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., 1988, Belém. Anais [...]. Belém: SBG, 1988. v. 2, p. 753–760.
- ALMEIDA, N. **Análise de viabilidade técnica para a utilização de resíduos de construção e demolição no subleito e na base de um pavimento em concreto permeável.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2017.
- ANDRADE FILHO, A. G.; SZÉLIGA, M. R.; ENOMOTO, C. F. **Estudo de medidas não estruturais para controle de inundações urbanas.** 2000. Ciências Exatas e da Terra, Ciências Agrárias e Engenharias, v. 6, n. 1, p. 69–90, 2000.
- ASSIS, D. R. S.; PIMENTEL, R. M. M.; CASTILHO, C. J. M. **Impactos da urbanização e vulnerabilidade de lagoas costeiras.** 2013. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 6, n. 2, p. 223–232, 2013. DOI: 10.26848/rbgf.v06.2.p223-232. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/232884>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16416: **Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15527: **Aproveitamento de água de chuva de coberturas para fins não potáveis — Requisitos.** Rio de Janeiro, 2019.
- ASSUNÇÃO, L. V.; ASSUNÇÃO, R. V.; BOLINA, C. C.; FREITAS, A. L.; LEMOS, M. I.; AMARAL, F. L.; MOREIRA, S. J. **Aproveitamento da água da chuva em bacias sanitárias de uma edificação residencial.** 2015. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, DF, nov. 2015. 7 p.
- BARCARO, Y. S.; MARTINS, R. M.; CRUZ, A. F. R.; FURTADO NETO, G. **Telhado verde associado ao reuso d'água pluvial: estudo de mitigação dos efeitos das**

chuvas abundantes e de escassez de água em centros urbanos / Green roof associated with Rainwater reuse: mitigation study of the effects of abundant rain and water scarcity in urban centers. 2021. Disponível em:
<http://dspace.doctum.edu.br:8080/xmlui/handle/123456789/3666?show=full>.

BASTOS, C. B. Implantação de jardins de chuva como técnica compensatória ao sistema de drenagem urbana na cidade de Santa Maria/RS. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2021.

BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; BERTOL, C.; LUCIANO, R. V. Infiltração de água em dois solos cultivados no sul do Brasil. 2010. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 1745–1754, 2010. Disponível em:
<https://www.rbcjournal.org/pt-br/article/infiltracao-de-agua-em-dois-solos-cultivados-no-sul-do-brasil/>.

BEZERRA, S. M. C.; CHRISTAN, P.; TEIXEIRA, C. A.; FARAHBAKHS, K. Dimensionamento de reservatório para aproveitamento de água de chuva: comparação entre métodos da ABNT NBR 15527:2007 e Decreto Municipal 293/2006 de Curitiba, PR / Sizing rainwater harvesting reservoirs: a comparison between methods of ABNT NBR 15527:2007 and of Municipal Decree 293/2006 from the city of Curitiba, PR. 2010. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 219-231, out./dez. 2010. ISSN 1678-8621.

BRASIL. Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979. Dispõe sobre o parcelamento do solo urbano e dá outras providências. Brasília, DF, 1979.

CABRAL, L. N.; CÂNDIDO, G. A. Urbanização, vulnerabilidade, resiliência: relações conceituais e compreensões de causa e efeito. 2019. urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 11, e20180063, 2019. Disponível em:
<https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.002.AO08>.

CABRAL, M. C.; KEMPKA, M.; KURITZA, J. C. Aproveitamento de água de chuva em estabelecimentos comerciais. 2019. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu, PR, nov. 2019. 9 p.

CABRAL, V. P.; BRAGA, E. M. Estudo da implantação de sistemas de drenagem sustentáveis em lote urbano. 2024. Contribuciones a Las Ciencias Sociales, São José dos Pinhais, v. 17, n. 2, p. 1-22, 2024. DOI: 10.55905/revconv.17n.2-223.
 Disponível em:
<https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/4827>.

CAMPISANO, A.; CATANIA, F. V.; MODICA, C. Evaluating the SWMM LID Editor rain barrel option for the estimation of retention potential of rainwater harvesting systems. 2016. Urban Water Journal, v. 14, n. 8, p. 876–881, 2016.
 DOI: 10.1080/1573062X.2016.1254259.

CAPUTO, U. K.; MOURA, P. M.; OLIVEIRA, N.; AGUIAR, I. Trincheiras de infiltração instaladas em Belo Horizonte – aspectos operacionais. 2013. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, RS, 2013.

- CARVALHO, G. S.; OLIVEIRA, S. C.; MORUZZI, R. B. **Cálculo do volume do reservatório de sistemas de aproveitamento de água de chuva: comparação entre métodos para aplicação em residência unifamiliar / Cistern volume calculation for Rainwater harvesting systems: comparison between methods seeking household application.** 2007. In: X Simpósio Nacional de Sistemas Prediais. Sistemas Prediais: Desenvolvimento e inovação, São Carlos, 30 e 31 ago. 2007.
- CEMADEN – CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS. **Mapa Interativo da Rede Observacional para Monitoramento de Risco de Desastres Naturais do Cemaden**, 2024. Disponível em: <http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/#>.
- CHAVES, J. V. B. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica com geração de mapas de perigo de inundação na Bacia do Tapacurá.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2023.
- COLLODEL, M. G. **Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão.** 2009. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. 146 f.
- COUTINHO, A. P. **Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife.** 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2011. 133 f.
- DARONCO, G. C.; MINUZZI, P. **Drenagem urbana: trincheiras de infiltração como medida alternativa no controle do escoamento superficial causado pela urbanização em loteamentos – estudo de caso na cidade de Santa Rosa.** 2018. In: 11º Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, Porto Alegre, RS, out. 2018.
- DIAS, F. S.; ANTUNES, P. T. S. C. **Estudo comparativo de projeto de drenagem convencional e sustentável para controle de escoamento superficial em ambientes urbanos.** 2010. Projeto de Graduação, Curso de Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2010. 100 f.
- DORNELLES, F.; TASSI, R.; GOLDENFUM, J. A. **Avaliação das técnicas de dimensionamento de reservatórios para aproveitamento de água de chuva.** 2010. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 15, n. 2, p. 59-68, abr./jun. 2010.
- ESA – EUROPEAN SPACE AGENCY. **WorldCover da Agência Espacial Europeia (ESA)**, 2021. Disponível em: <https://esa-worldcover.org/e/>.
- FERREIRA, C. A.; MORUZZI, R. B. **Considerações sobre a aplicação do telhado verde para captação de água de chuva em sistemas de aproveitamento para fins não potáveis.** 2007. In: IV Encontro Nacional e II Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, Campo Grande, 2007. p. 1-10. Disponível em:

https://igce.rc.unesp.br/Home/Departamentos47/planejamentoterritorialegeoprocessamento640/md_rodrigo_artigos_consideracoes.pdf.

FENDRINCH, R. Coleta, armazenamento, utilização e infiltração das águas pluviais na drenagem urbana. 2002. Tese (Doutorado em Geologia) – Curso de Pós-graduação em Geologia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

FONSECA, M. C. Análise financeira de um sistema de aproveitamento de água de chuva em unidade hospitalar. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Natal, RN, 101 f.

FONSECA, P. L. L. Resiliência urbana associada aos sistemas de drenagem sustentáveis: técnicas compensatórias em manejo de águas pluviais. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru, 2023.

FORMENTINI, A. B.; MONTEIRO, D. C. P.; SOTERO, E. M. O. A drenagem urbana das águas pluviais e sua relação com a impermeabilização do solo na Avenida Ininga. 2024. Revista Contemporânea, v. 4, n. 1, p. 3504–3512, 2024. DOI: 10.56083/RCV4N1-196. Disponível em: <https://ojs.revistacontemporanea.com/ojs/index.php/home/article/view/3159>.

GARRIDO NETO, P. S. Telhados verdes associados com sistema de aproveitamento de água de chuva: projeto de dois protótipos para futuros estudos sobre esta técnica compensatória em drenagem urbana e prática sustentável na construção civil. 2012. Projeto de Graduação, Curso de Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2012.

GOMES, E. O.; ANDRADE, P. R. G. S.; BOMFIM, T. O.; SANTOS, R. L.; MACHADO, A. R. Vazão de escoamento superficial e dimensionamento de reservatório pós construção de conjunto habitacional popular. 2023. Open Science Research, v. 12, 2023. ISBN 978-65-5360-398-1. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/books/chapter/230813978>.

GONÇALVES, R. M.; PACHECO, A. P.; TANAJURA, E. L. X.; SILVA, L. M. Urbanização costeira e sombreamento na praia de Boa Viagem, Recife-PE, Brasil. 2013. Revista de Geografia Norte Grande, n. 54, p. 241-255, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022013000100013>.

IBGE. Brasil – Unidades da Federação, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>.

JABUR, A. S.; DORNELLES, F.; SILVEIRA, A. L. L.; GOLDENFUM, J. A.; OKAWA, C. M. P.; GASPARINI, R. R. Determinação da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis. 2015. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 20, n. 4, p. 937-945, out./dez. 2015.

- JESUS, T. B.; SILVA, E. H. B. C. **Captação de água de chuva em um grande edifício público.** 2017. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, SC, 26 nov. a 1 dez. 2017.
- KREBS, G.; KUOPPAMÄKI, K.; KOKKONEN, T.; KOIVUSALO, H. ***Simulation of green roof test bed runoff.*** 2015. Hydrological Processes, v. 30, p. 250–262, 2015. DOI: 10.1002/hyp.10605.
- LI, C.; LIU, M.; HU, Y.; GONG, J.; XU, Y. ***Modeling the quality and quantity of runoff in a highly urbanized catchment using Storm Water Management Model.*** 2016. Polish Journal of Environmental Studies, v. 25, n. 4, p. 1573–1581, 2016. DOI: 10.15244/pjoes/60721.
- LI, J. Q.; ZHAO, W. W. ***Design and hydrologic estimation method of multi-purpose rain garden: Beijing case study.*** 2008. In: International Low Impact Development Conference, Seattle, 2008. Proceedings.
- LUENGO, D.; MARTINO, L.; BUGALLO, M.; ELVIRA, V.; SÄRKKÄ, S. ***A survey of Monte Carlo methods for parameter estimation.*** 2020. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13634-020-00675-6>.
- MACIEL, S. J.; CRESPO, J. L. **Desafios urbanos contemporâneos: a problemática da habitabilidade na Região Metropolitana do Recife (Brasil).** 2021. In: PLURIS 2021 DIGITAL, 9., 2021, Online. Anais [...]. Pequenas cidades, grandes desafios, múltiplas oportunidades. p. 886–898. Disponível em: <https://pluris2020.faac.unesp.br/Paper886.pdf>.
- MAEBARA, A. K.; BARRETO, D. **Estudo do potencial do aproveitamento de água de chuva na demanda de água potável na região sudeste.** 2017. Congresso ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. FENASAN 2017. AESABESP - Associação dos Engenheiros da Sabesp.
- MARINHO, G.; LEITÃO, L.; LACERDA, N. **Transformações urbanísticas na região metropolitana do Recife: um estudo prospectivo.** 2007. Cadernos Metrópole, n. 17, 2007. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/index.php/metropole/article/view/8770>.
- MARINOSKI, D. L.; GHISI, E.; GÓMEZ, L. A. **Aproveitamento de água pluvial e dimensionamento de reservatório para fins não potáveis: estudo de caso em um conjunto residencial localizado em Florianópolis-SC.** 2004. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, São Paulo, 18 a 21 jul. 2004. 14 p. ISBN 85-89478-08-4.
- MAY, S. **Estudo da viabilidade do aproveitamento de água de chuva para consumo não potável em edificações.** 2004. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2004.

MELO, C. R.; GUEDES, P. A.; OTTONI, M. V.; MELO, S. C. **Análise do balanço hídrico no solo, em relação aos deslizamentos de 28/05/2022, em Jardim Monte Verde, PE.** 2022. III Encontro Nacional de Desastres, 2022. ISSN 2764-9040.

MELO, T. A. T. **Jardim de chuva: sistema de biorretenção como técnica compensatória no manejo de águas pluviais urbanas.** 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 137 p., 2011.

MELO, T. A. T.; COUTINHO, A. P.; CABRAL, J. J. S. P.; CIRILO, J. A.; ANTONINO, A. C. D. **Desafios para o manejo das águas pluviais na cidade do Recife – A contribuição da UFPE.** 2013. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves, RS. Anais... Disponível em: <http://www.abrh.org.br/xxsbrh>.

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.** 2014. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 147-165, out./dez. 2014. ISSN 1678-8621.

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.** 2016. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 53-72, jul./set. 2016. ISSN 1678-8621. DOI: 10.1590/s1678-86212016000300092.

MONTE, R. M.; LEITE, J. F. A. **A drenagem urbana de águas pluviais e seus impactos cenário atual da Bacia do Córrego Vaca-Brava, Goiânia – GO.** 2008. Universidade Católica de Goiás, Departamento de Engenharia – Engenharia Ambiental, Goiânia, 2008.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 81 p., 2005.

NAGEM, F. R. M. **Avaliação econômica dos prejuízos causados pelas cheias urbanas.** 2008. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 114 p.

NUNES, D. M.; FONSECA, P. L.; SILVA, L. P. **Avaliação do papel dos telhados verdes no desenho e desenvolvimento urbano de baixo impacto ambiental e no controle de enchentes na Cidade do Rio de Janeiro.** 2017. Labor & Engenho, Campinas, v. 11, n. 3, p. 374-393, jul./set. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/labore.v11i3.8648820>.

OLIVEIRA, A. P.; BARBASSA, A. P.; GONÇALVES, L. M. **Aplicação de técnicas compensatórias de drenagem na requalificação de áreas verdes urbanas em Guarulhos-SP.** 2016. Cidades Verdes, v. 4, n. 9, p. 87-101, 2016.

OLIVEIRA, C. A. **Avaliação do desempenho de estruturas de baixo impacto para o manejo de águas pluviais em lotes residenciais urbanos.** 2024. Dissertação

(Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, João Pessoa.

OLIVEIRA, I. J. L. S.; RABELO, M. B. G.; PATRY, N. C.; LEO, J. R.; FERREIRA, J. P. **Benefícios da implantação dos jardins de chuva no meio urbano. XI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental.** 2020. IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, Vitória/ES, 23 a 26 nov. 2020.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. Manual de observações meteorológicas de superfície. Genebra: OMM, 2008. (WMO No. 544).

PALLA, A.; GNECCO, I.; LA BARBERA, P. **The impact of domestic rainwater harvesting systems in storm water runoff mitigation at the urban block scale.** 2017. Journal of Environmental Management, v. 191, p. 297-305, 2017. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.01.025.

PORTO, R. L.; ZAHED FILHO, K.; TUCCI, C. E. M.; BIDONE, F. **Capítulo 21 – Drenagem urbana.** 2020. In: TUCCI, C. E. M. (org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: ABRH, 2020. p. 805–848.

POTDEVIN, Y. R. **Ocupação de áreas de encosta no território de Jardim Monte Verde: intervenções da gestão e do planejamento urbano municipal e a questão habitacional em Jaboatão dos Guararapes-PE.** 2023. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Departamento de Ciências Geográficas, Recife.

RANGEL, A. C. L. C.; ARANHA, K. C.; SILVA, M. C. B. C. **Os telhados verdes nas políticas ambientais como medida indutora para a sustentabilidade.** 2015. Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 35, p. 397-409, 2015.

ReCESA. **Águas pluviais: técnicas compensatórias para o controle de cheias urbanas - guia do profissional em treinamento nível 2 e 3 /** Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). 2007. Belo Horizonte: Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental – ReCESA, 2007. 52 p.

RECIFE. Lei Nº 18.112, de 12 de janeiro de 2015 – que dispõe sobre a melhoria de qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do “telhado verde”, e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento de águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências.

REIS, R. P. A. **Avaliação de desempenho e modelagem numérica de sistemas de infiltração de água de chuva integrados aos sistemas prediais.** 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

REIS, R. P. A.; ILHA, M. S. O. **Comparação de desempenho hidrológico de sistemas de infiltração de água de chuva: poço de infiltração e jardim de chuva.** 2014. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 79-90, abr./jun.

2014. ISSN 1678-8621. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

REIS, R. P. A.; OLIVEIRA, L. H.; SALES, M. M. **Sistemas de drenagem na fonte por poços de infiltração de águas pluviais**. 2008. Ambiente Construído, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 99–117, 2008. Disponível em:
<https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/5361>.

REZENDE, J. H.; TECEDOR, N. **Aproveitamento de água de chuva de cobertura em edificações: dimensionamento do reservatório pelos métodos descritos na NBR 15527**. 2017. Revista Ambiente & Água, Taubaté, v. 12, n. 6, nov./dez. 2017.

RIBAS, L. V. S.; MELLO, P. H. B. B. **Aproveitamento de águas pluviais na Região Metropolitana do Recife: aplicação para um fim não potável**. 2014. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Civil, Recife, 2014. 11, n. 3, p. 374-393, jul./set. 2017. DOI:
<http://dx.doi.org/10.20396/labore.v11i3.8648820>.

RIBEIRO, P. S. **Resiliência hídrica: o potencial de reúso de água de chuva no município do Rio de Janeiro**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Ciências Ambientais) – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Instituto de Biociências, Rio de Janeiro, 75 f.

RIBEIRO, W. C. **Riscos e Vulnerabilidade Urbana no Brasil**. 2010. Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía Y Ciencias Sociales, 2010. Universidad de Barcelona. Depósito Legal: B. 21.741-98, Vol. XIV, núm. 331 (65). Disponível em:
<https://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-331/sn-331-65.htm>

ROCHA, B. C. C. M.; REIS, R. P. A.; ARAÚJO, J. V. G. **Avaliação do volume necessário de descarte de água de chuva escoada sobre coberturas de diferentes materiais**. 2011. Revista Eletrônica de Engenharia Civil (REEC), Goiânia, v. 2, n. 1, 2011. DOI: 10.5216/reec.v2i1.16707. Disponível em:
<https://revistas.ufg.br/reec/article/view/16707>.

ROLA, S. M. **A naturação como ferramenta para a sustentabilidade de cidades: estudo da capacidade do sistema de maturação em filtrar a água de chuva**. 2008. 222 f. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model: User's Manual Version 5.1**. 2015. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory, 2015. (EPA/600/R-14/413b). Disponível em:
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100N3J6.txt>.

ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C. **Storm Water Management Model Reference Manual. Volume I – Hydrology (Revised)**. 2016a. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, 2016a.

ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C. *Storm Water Management Model Reference Manual. Volume III – Water Quality (Revised)*. 2017b. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, 2016b.

SALGUEIRO, C. O. B.; LEONARDO, H. R. A. L.; OLIVEIRA, L. M. M.; SANTOS, S. M. **Sensoriamento Remoto aplicado na Avaliação do Impacto do Armazenamento da Água de Chuva no Sistema de Drenagem Urbana**. 2021. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 14, n. 06 (2021) 3514-3529.

SANTOS, A. B. **Reservatórios de águas pluviais como auxílio da drenagem urbana na cidade do Recife**. 2023. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife, 2023.

SIDRA – SISTEMA IBGE DE RECUPERAÇÃO AUTOMÁTICA. **Tabela 4712 - Domicílios particulares permanentes ocupados, Moradores em domicílios particulares permanentes ocupados e Média de moradores em domicílios particulares permanentes ocupados**. 2022a. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/4712>.

SIDRA – SISTEMA IBGE DE RECUPERAÇÃO AUTOMÁTICA. **Tabela 4714 - População residente, área territorial e densidade demográfica**. 2022b. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/4714>.

SIDRA – SISTEMA IBGE DE RECUPERAÇÃO AUTOMÁTICA. **Tabela 5938 - Produto interno bruto a preços correntes, impostos, líquidos de subsídios, sobre produtos a preços correntes e valor adicionado bruto a preços correntes total e por atividade econômica, e respectivas participações - Referência 2010**. 2021. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5938>.

SILVA, A. C.; SILVA, O. G.; SILVA, D. N. F.; CORRÊA, A. C. B. **Mudanças do uso e ocupação da terra a partir da expansão urbana e as influências climáticas sobre a morfodinâmica no município do Recife/PE entre 1975 e 2015**. 2016. Revista Cerrados [S. I.], Montes Claros, 2016, v.13, n.1, p. 33-49, dez/2015. ISSN: 2448-2692. Disponível em: <https://www.periodicos.unimontes.br/index.php/cerrados/article/view/1421>.

SILVA, C. M.; SILVA, G. B. L. **Cumulative effect of the disconnection of impervious areas within residential lots on runoff generation and temporal patterns in a small urban area**. 2019. Journal of Environmental Management, 253, 109719. 2020. ISSN 0301-4797. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109719>.

SILVA, D. F.; TUCCI, C. E. M.; MARQUES, P. K.; COSTA, M. E. L.; CORREA, A. C. S.; MONTEIRO, M. P.; ARAÚJO, L. M. N. **Drenagem e manejo de águas pluviais no Brasil: conceitos, gestão e estudos de caso**. 2024. Revista de Gestão de Água da América Latina, 21, e1. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rega.v21e1>

SILVA, E. C. **Variabilidade espaço-temporal da pluviosidade da região metropolitana de Recife**. 2018. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, CTG - CENTRO DE

TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS Recife, 2018. 115 f. Disponível em:
<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/32850>

SILVA, G. B. L. Avaliação experimental sobre a eficiência de superfícies permeáveis com vistas ao controle do escoamento superficial em áreas urbanas. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SILVA, M. C.; DUARTE, S. Concepção e projeto de métodos construtivos sustentáveis: aplicação de telhado verde e aproveitamento de água pluvial em um ambiente escolar. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, SC, 2017.

SILVA, R. C.; TEIXEIRA, K. O.; SANTOS, V. A. Elaboração de projeto de jardins de chuvas para minimização das enchentes. 2020. Revista CONSTRUINDO, Belo Horizonte. Volume 12, número 01, p. 56 – 66, Jan/Jun, 2020. Disponível em: <http://revista.fumec.br/index.php/construindo/article/view/6422>

SIVIERO, F. M. Avaliação do desempenho de dois poços de infiltração com características distintas como medida de contenção de drenagem urbana na fonte. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em engenharia e Ciências Ambientais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ucs.br/xmlui/handle/11338/3812>>.

SOUZA, M. A. A. Política habitacional para os excluídos: o caso da Região Metropolitana do Recife. 2007. Coleção Habitare - Habitação Social nas Metrópoles Brasileiras - Uma avaliação das políticas habitacionais em Belém, Belo Horizonte, Porto Alegre, Recife, Rio de Janeiro e São Paulo no final do século XX / Org. Adauto Lucio Cardoso. Coleção HABITARE/FINEP. Porto Alegre: ANTAC, 2007. p. 114-149

SOUZA, W. M. Impactos socioeconômicos e ambientais dos desastres associados às chuvas na cidade do Recife-PE. 2011. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande.

SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V.; Índices de Detecção de Mudanças Climáticas Derivados da Precipitação Pluviométrica e das Temperaturas em Recife-PE / Detection Indexes Derived from Climate Change Rainfall and Temperatures in Recife-PE). 2012. Revista Brasileira de Geografia Física, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 143–159, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/232793>.

SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V.; ASSIS, J. M. O.; SOBRAL, M. C. 2014. **Áreas de risco mais vulneráveis aos desastres decorrentes das chuvas em Recife-PE.** 2014. Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB), Rio de Janeiro, n. 34, p. 79–94, 2014. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/219.

SPONCHIADO, E. **Poço de infiltração e pavimento permeável como técnica compensatória de drenagem urbana de controle na fonte.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2021.

TASSI, R.; TASSINARI, L. C. S.; PICCILLI, D. G. A.; PERSCH, C. G. **Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais.** 2014. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 139-154, jan./mar. 2014. ISSN 1678-8621

TOMAZ, P. **Aproveitamento de água de chuva em áreas urbanas para fins não potáveis.** 2010. Guarulhos, SP, 11 jan. 2010. ISBN 85-87678-23-X.

TSUJI, T. M.; FREITAS, T. F. C.; PEREIRA, A. R.; UDA, P. K.; FINOTTI, A. R. **Panorama dos instrumentos de planejamento e gestão da drenagem urbana no Brasil / Brazilian urban drainage planning and management overview.** 2023. Paranoá, [S. I.], v. 16, n. 34, p. 1–23, 2023. DOI: 10.18830/issn.1679-0944.n34.2023.14. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/paranoa/article/view/47408>.

TUCCI, C. E. M. **Gestão da drenagem urbana.** 2012. Brasília, DF: CEPAL. Escritório no Brasil/IPEA, 2012.

UNITED STATES. **Environmental Protection Agency. Storm Water Management Model (SWMM).** 2023. Washington, D.C. Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>.

VIEIRA, Z. C.; BARROSO, M. L. A.; SANTOS, D. L.; FERRO, C. F. **Análise de um protótipo de poço de infiltração para uso em edificações como técnica compensatória em drenagem urbana.** 2020. Revista Expressão Científica – ISSN 2447-9209. Vol V, ano 05, nº 2, 2020 P9-19.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de Projeto e Execução de Pavimentos Permeáveis Visando Retenção e Amortecimento de Picos de Cheias.** 2009. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. 191 p. São Paulo, 2009.

YEN, B. C. **Hydraulics of Sewer Systems.** 2001. Chapter 6 in Stormwater Collection Systems Design Handbook, L.M. Mays, ed., McGraw-Hill, New York, 2001.

APÊNDICE A – Caracterização das estações pluviométricas

Tabela A.1 - Caracterização das estações pluviométricas com base nos dados informados pelo CEMADEN

Município	Código de estação	Estação	Latitude	Longitude
Abreu e Lima	260005401A	Distrito Industrial – Timbó	-7,917	-34,898
Abreu e Lima	260005402A	ABREU E LIMA – APAC	-7,895636	-34,941958
Araçoiaba	260105201A	ARAÇOIABA – APAC	-7,789111	-35,091472
Cabo de Santo Agostinho	260290201G	Pirapama	-8,282031	-35,064672
Cabo de Santo Agostinho	260290202A	Charneca	-8,297	-35,057
Cabo de Santo Agostinho	260290203A	Torrinha	-8,287	-35,033
Cabo de Santo Agostinho	260290204A	Enseado dos Corais	-8,33	-34,956
Cabo de Santo Agostinho	260290205A	Pontes dos Carvalhos	-8,233	-34,979
Camaragibe	260345401A	Timbi	-8,026	-34,993
Camaragibe	260345401G	Convento Carmelo	-8,020025	-34,977156
Camaragibe	260345402A	Alberto Maia	-8,02	-35,003
Camaragibe	260345403A	Bairro dos Estados	-8,026	-34,975
Camaragibe	260345404A	Jardim Primavera	-8,012	-34,969
Camaragibe	260345405A	Vila da Fábrica	-7,999	-34,98
Camaragibe	260345406A	Aldeia	-7,956	-35,009
Igarassu	260680402A	Três Ladeiras	-7,758	-35,036
Igarassu	260680403A	Alto do Céu	-7,807	-34,933
Igarassu	260680404A	Cruz de Rebouças	-7,874	-34,916
Igarassu	260680405A	Cruz de Rebouças2	-7,871	-34,862
Igarassu	260680406A	IGARASSU - APAC	-7,87247	-34,91201
Ilha de Itamaracá	260760401A	ILHA DE ITAMARACA - APAC	-7,76845	-34,86882
Ipojuca	260720801A	Centro	-8,4	-35,064
Ipojuca	260720801G	Campo do Avião	-8,399458	-35,058455
Ipojuca	260720802A	Camela	-8,511	-35,122
Ipojuca	260720803A	Porto de Galinhas	-8,507	-35,004
Ipojuca	260720804A	Rurópolis	-8,411	-35,07
Ipojuca	260720805A	NÚCLEO MARANHÃO - APAC	-8,368205	-35,13522
Itapissuma	260775201A	BOTAFOGO - APAC	-7,74968	-34,93442
Jaboatão dos Guararapes	260790101A	Muribeca	-8,157	-34,968
Jaboatão dos Guararapes	260790101G	Socorro	-8,105084	-34,998349

Município	Código de estação	Estação	Latitude	Longitude
Jaboatão dos Guararapes	260790102A	Cavaleiro2	-8,09	-34,97
Jaboatão dos Guararapes	260790102G	Alto Vento	-8,100284	-34,982616
Jaboatão dos Guararapes	260790103A	Cavaleiro	-8,096	-34,971
Jaboatão dos Guararapes	260790103G	Curado II	-8,082069	-35,002892
Jaboatão dos Guararapes	260790104A	Prazeres	-8,188	-34,953
Jaboatão dos Guararapes	260790104G	Alto do Reservatório	-8,098711	-34,974641
Jaboatão dos Guararapes	260790105G	Manassu	-8,08619	-35,028697
Jaboatão dos Guararapes	260790106A	Piedade	-8,154	-34,914
Jaboatão dos Guararapes	260790106G	COMPESA - Dois Carneiros	-8,110775	-34,964464
Jaboatão dos Guararapes	260790107A	Centro	-8,112	-35,015
Jaboatão dos Guararapes	260790108A	Curadoll	-8,08	-34,997
Jaboatão dos Guararapes		Curado 4	-8,07105	-34,99392
Jaboatão dos Guararapes	260790109A	Barra de Jangada	-8,22	-34,932
Jaboatão dos Guararapes	260790110A	Cajueiro Seco	-8,168	-34,928
Jaboatão dos Guararapes	260790115H	Santana	-8,1088	-34,99944
Jaboatão dos Guararapes	260790119H	Engenho Velho	-8,111846	-35,013613
Moreno	260940201A	Bonança	-8,105	-35,195
Moreno	260940202A	Centro	-8,118	-35,101
Olinda	260960001A	Águas Compridas	-7,983	-34,912
Olinda	260960001G	Caixa D'Água	-7,994922	-34,905648
Olinda	260960002A	Aguazinha	-7,999	-34,887
Olinda	260960003A	Bonsucesso	-8,008	-34,851
Olinda	260960004A	Jardim Fragoso	-7,984	-34,853
Olinda	260960005A	Tabajara	-7,973	-34,868
Paulista	261070701A	Paratibe	-7,93	-34,903
Paulista	261070702A	Vila Torres Galvão	-7,958	-34,876

Município	Código de estação	Estação	Latitude	Longitude
Paulista	261070703A	Maria Farinha	-7,853	-34,836
Paulista	261070704A	Janga	-7,918	-34,829
Paulista	261070705A	Janga2	-7,954	-34,83
Paulista	261070706A	Centro	-7,941	-34,88
Paulista	261070707A	PAULISTA - APAC	-7,93168	-34,94455
Recife	261160601A	Varzea	-8,036	-34,98
Recife	261160603A	Estação Experimental UFRPE / Dois irmãos	-8,018378	-34,947058
Recife	261160603G	Brega e Chique	-8,038048	-34,979298
Recife	261160604A	USF Alto Bela Vista-Ibura	-8,123583	-34,941528
Recife	261160604G	Barreira	-8,024215	-34,964622
Recife	261160605A	UPA de Nova Descoberta	-8,001917	-34,919278
Recife	261160605G	UR3 - Ibura	-8,114365	-34,949029
Recife	261160606A	Dois Unidos	-7,996278	-34,909167
Recife	261160606G	Lagoa Encantada - COHAB	-8,11784	-34,950142
Recife	261160607A	Alto do Céu	-8,012	-34,892
Recife	261160607G	UR2 - COHAB	-8,121034	-34,952593
Recife	261160608A	Corrego Jenipapo	-8,007	-34,936
Recife	261160608G	Manassu	-8,08619	-35,028697
Recife	261160609A	UPA da Imbiribeira / Imbiribeira	-8,120975	-34,913983
Recife	261160609G	UR12 - COHAB	-8,13064	-34,933022
Recife	261160610A	Alto Mandu	-8,024	-34,927
Recife	261160610G	Nova Descoberta	-8,000933	-34,932956
Recife	261160611G	UR12 - COHAB II	-8,125	-34,954
Recife	261160612A	Guabiraba	-7,994	-34,936
Recife	261160613A	Morro da Conceição	-8,019	-34,915
Recife	261160613G	COMPESA - Alto da Esperança	-7,995841	-34,915624
Recife	261160614A	Campina do Barreto	-8,013	-34,881
Recife	261160615A	Ibura	-8,122	-34,955
Recife	261160615G	COMPESA - Alto da Brasileira	-8,001254	-34,935572
Recife	261160616A	Várzea	-8,039	-34,959
Recife	261160616G	COMPASZ - Alto Sta. Terezinha	-8,00919	-34,902819
Recife	261160617A	Pina	-8,099	-34,887
Recife	261160618A	Torreão	-8,037	-34,884
Recife	261160619A	San Martin	-8,073	-34,925
Recife	261160620A	Porto	-8,054	-34,873
Recife	261160621A	Areias	-8,102	-34,929
Recife	261160622A	Boa Vista	-8,069	-34,891
Recife	261160623A	RECIFE - APAC	-8,04491	-34,87518
São Lourenço da Mata	261370101A	Chã da Tábua	-7,995	-35,035

Município	Código de estação	Estação	Latitude	Longitude
São Lourenço da Mata	261370102A	Nossa Senhora da Luz	-8,037	-35,1
São Lourenço da Mata	261370103A	Tiúma	-7,979	-35,073
São Lourenço da Mata	261370104A	Rua dos Milagres	-8,01	-35,016
São Lourenço da Mata	261370105A	SAO LOURENCO DA MATA - APAC	-7,99419	-35,03699

APÊNDICE B – Parâmetros utilizados para cada sub-bacia no SWMM

Tabela B.1 - Parâmetros de entrada utilizados para as sub-bacias no modelo SWMM.

APÊNDICE C – Caracterização detalhada dos eventos registrados entre março e junho de 2022, incluindo informações sobre duração e intensidade.

Tabela C.1 - Duração e intensidade dos eventos registrados entre março e junho de 2022.

	Data	Hora final	Precipitação total (mm)	Duração (min)	Intensidade (mm/h)
1	03/04/2022	14:00:00	0.4	20	1.20
2	09/04/2022	00:00:00	0.4	20	1.20
3	16/04/2022	07:00:00	0.4	20	1.20
4	19/04/2022	22:10:00	0.4	20	1.20
5	27/04/2022	11:30:00	0.4	20	1.20
6	28/04/2022	19:40:00	0.4	30	0.80
7	01/05/2022	09:00:00	0.4	20	1.20
8	02/05/2022	04:30:00	0.4	20	1.20
9	04/05/2022	04:20:00	0.4	30	0.80
10	14/05/2022	03:30:00	0.4	20	1.20
11	15/05/2022	12:10:00	0.4	30	0.80
12	16/05/2022	13:50:00	0.4	30	0.80
13	31/05/2022	04:10:00	0.4	20	1.20
14	01/06/2022	10:00:00	0.4	20	1.20
15	03/06/2022	01:10:00	0.4	20	1.20
16	03/06/2022	03:10:00	0.4	20	1.20
17	03/06/2022	15:20:00	0.4	20	1.20
18	05/06/2022	04:10:00	0.4	30	0.80
19	10/06/2022	07:40:00	0.4	20	1.20
20	17/06/2022	06:00:00	0.4	20	1.20
21	22/06/2022	11:00:00	0.4	30	0.80
22	22/06/2022	17:40:00	0.4	20	1.20
23	28/06/2022	22:00:00	0.4	20	1.20
24	30/06/2022	14:10:00	0.4	20	1.20
25	15/03/2022	10:00:00	0.4	20	1.20
26	22/03/2022	21:00:00	0.4	30	0.80
27	23/03/2022	16:30:00	0.4	20	1.20
28	29/03/2022	10:30:00	0.4	20	1.20
29	06/04/2022	09:40:00	0.59	20	1.77
30	07/04/2022	08:00:00	0.59	20	1.77
31	06/05/2022	10:40:00	0.59	20	1.77
32	14/05/2022	12:10:00	0.59	20	1.77
33	20/05/2022	18:40:00	0.59	20	1.77
34	24/05/2022	10:00:00	0.59	20	1.77
35	31/05/2022	17:00:00	0.59	20	1.77
36	01/06/2022	22:50:00	0.59	20	1.77
37	03/06/2022	04:20:00	0.59	30	1.18
38	14/06/2022	23:30:00	0.59	20	1.77
39	24/06/2022	01:40:00	0.59	20	1.77

	Data	Hora final	Precipitação total (mm)	Duração (min)	Intensidade (mm/h)
40	06/03/2022	04:10:00	0.59	20	1.77
41	17/04/2022	09:30:00	0.6	40	0.90
42	25/04/2022	10:30:00	0.6	30	1.20
43	26/05/2022	20:10:00	0.6	20	1.80
44	28/05/2022	20:20:00	0.6	30	1.20
45	31/05/2022	03:20:00	0.6	40	0.90
46	29/06/2022	04:20:00	0.6	30	1.20
47	01/05/2022	01:10:00	0.62	20	1.86
48	07/06/2022	17:30:00	0.62	20	1.86
49	15/06/2022	13:40:00	0.62	20	1.86
50	05/03/2022	01:20:00	0.62	20	1.86
51	10/03/2022	03:20:00	0.62	20	1.86
52	30/06/2022	09:20:00	0.78	20	2.34
53	20/04/2022	02:20:00	0.79	40	1.19
54	23/04/2022	06:00:00	0.79	20	2.37
55	03/05/2022	00:50:00	0.79	20	2.37
56	08/05/2022	06:30:00	0.79	30	1.58
57	17/05/2022	04:20:00	0.79	30	1.58
58	26/05/2022	07:50:00	0.79	20	2.37
59	06/06/2022	04:20:00	0.79	20	2.37
60	23/03/2022	07:30:00	0.79	20	2.37
61	05/03/2022	23:30:00	0.8	60	0.80
62	24/05/2022	17:20:00	0.81	20	2.43
63	04/06/2022	17:00:00	0.82	30	1.64
64	03/04/2022	08:10:00	0.98	20	2.94
65	08/04/2022	08:20:00	0.98	20	2.94
66	24/03/2022	03:00:00	0.98	20	2.94
67	26/03/2022	20:30:00	0.98	20	2.94
68	06/05/2022	03:40:00	0.99	20	2.97
69	06/06/2022	10:50:00	0.99	30	1.98
70	15/06/2022	22:40:00	0.99	30	1.98
71	19/06/2022	06:50:00	0.99	20	2.97
72	24/06/2022	00:10:00	0.99	30	1.98
73	11/06/2022	15:30:00	0.99	50	1.19
74	04/06/2022	03:30:00	1	70	0.86
75	16/03/2022	22:10:00	1.01	20	3.03
76	29/04/2022	10:50:00	1.17	40	1.76
77	31/05/2022	02:20:00	1.18	50	1.42
78	01/06/2022	05:50:00	1.18	20	3.54
79	24/06/2022	09:00:00	1.18	20	3.54
80	08/03/2022	08:00:00	1.18	20	3.54
81	11/03/2022	10:20:00	1.18	20	3.54
82	09/05/2022	00:00:00	1.18	50	1.42
83	13/03/2022	07:30:00	1.18	20	3.54
84	03/05/2022	09:50:00	1.19	50	1.43

	Data	Hora final	Precipitação total (mm)	Duração (min)	Intensidade (mm/h)
85	10/05/2022	12:10:00	1.19	50	1.43
86	23/04/2022	20:00:00	1.37	20	4.11
87	29/04/2022	15:10:00	1.37	20	4.11
88	24/06/2022	04:10:00	1.37	20	4.11
89	29/04/2022	17:40:00	1.38	20	4.14
90	21/05/2022	14:40:00	1.38	20	4.14
91	27/03/2022	01:30:00	1.38	20	4.14
92	20/04/2022	01:20:00	1.38	30	2.76
93	05/05/2022	19:30:00	1.4	20	4.20
94	07/03/2022	09:40:00	1.57	30	3.14
95	22/03/2022	09:10:00	1.57	30	3.14
96	01/04/2022	04:40:00	1.57	20	4.71
97	03/06/2022	05:30:00	1.57	40	2.36
98	07/06/2022	01:20:00	1.57	30	3.14
99	17/04/2022	07:10:00	1.58	30	3.16
100	05/06/2022	08:10:00	1.58	30	3.16
101	26/05/2022	11:50:00	1.76	30	3.52
102	05/03/2022	00:00:00	1.77	40	2.66
103	30/05/2022	12:40:00	1.77	40	2.66
104	22/06/2022	08:00:00	1.77	20	5.31
105	28/03/2022	08:50:00	1.77	20	5.31
106	01/05/2022	20:10:00	1.78	30	3.56
107	02/06/2022	06:00:00	1.78	30	3.56
108	15/03/2022	23:00:00	1.79	20	5.37
109	08/04/2022	22:00:00	1.8	40	2.70
110	08/04/2022	09:20:00	1.96	20	5.88
111	24/04/2022	04:00:00	1.96	20	5.88
112	26/03/2022	01:50:00	1.96	20	5.88
113	31/05/2022	23:30:00	1.97	50	2.36
114	08/04/2022	13:00:00	1.97	20	5.91
115	24/04/2022	08:40:00	1.98	40	2.97
116	25/04/2022	20:40:00	1.99	20	5.97
117	23/04/2022	10:50:00	2.16	40	3.24
118	13/04/2022	07:50:00	2.16	40	3.24
119	02/06/2022	20:50:00	2.16	30	4.32
120	06/03/2022	03:30:00	2.16	20	6.48
121	27/03/2022	14:50:00	2.16	30	4.32
122	28/03/2022	01:20:00	2.16	30	4.32
123	26/05/2022	20:50:00	2.17	20	6.51
124	02/05/2022	11:20:00	2.36	20	7.08
125	06/06/2022	19:30:00	2.36	40	3.54
126	19/03/2022	03:30:00	2.36	30	4.72
127	24/03/2022	02:20:00	2.36	40	3.54
128	24/06/2022	06:10:00	2.37	20	7.11
129	26/04/2022	06:40:00	2.55	40	3.83

	Data	Hora final	Precipitação total (mm)	Duração (min)	Intensidade (mm/h)
130	04/03/2022	20:10:00	2.55	30	5.10
131	06/04/2022	12:30:00	2.56	20	7.68
132	24/05/2022	12:00:00	2.56	20	7.68
133	24/06/2022	15:30:00	2.56	20	7.68
134	06/06/2022	14:40:00	2.56	40	3.84
135	03/04/2022	15:40:00	2.57	50	3.08
136	07/05/2022	17:20:00	2.57	60	2.57
137	28/03/2022	05:10:00	2.59	50	3.11
138	07/05/2022	08:50:00	2.75	30	5.50
139	26/05/2022	17:30:00	2.75	20	8.25
140	21/03/2022	08:30:00	2.75	20	8.25
141	11/06/2022	04:20:00	2.76	30	5.52
142	07/04/2022	04:30:00	2.76	20	8.28
143	21/03/2022	19:20:00	2.76	30	5.52
144	28/04/2022	22:50:00	2.95	50	3.54
145	22/05/2022	06:00:00	2.96	40	4.44
146	21/03/2022	03:30:00	2.96	60	2.96
147	24/03/2022	06:50:00	3.14	20	9.42
148	26/04/2022	05:40:00	3.15	20	9.45
149	11/06/2022	12:20:00	3.15	40	4.73
150	27/06/2022	19:30:00	3.15	30	6.30
151	14/03/2022	11:00:00	3.15	40	4.73
152	29/05/2022	05:50:00	3.16	110	1.72
153	01/05/2022	05:20:00	3.18	30	6.36
154	23/04/2022	04:40:00	3.18	60	3.18
155	20/04/2022	00:10:00	3.34	20	10.02
156	10/06/2022	07:10:00	3.34	30	6.68
157	20/06/2022	02:40:00	3.34	30	6.68
158	24/03/2022	14:10:00	3.34	40	5.01
159	05/05/2022	21:30:00	3.35	20	10.05
160	06/06/2022	13:20:00	3.35	30	6.70
161	11/05/2022	20:30:00	3.37	20	10.11
162	24/03/2022	20:40:00	3.55	40	5.33
163	24/03/2022	04:20:00	3.55	20	10.65
164	10/06/2022	02:50:00	3.56	70	3.05
165	31/05/2022	21:10:00	3.58	30	7.16
166	24/03/2022	12:30:00	3.74	30	7.48
167	31/05/2022	10:00:00	3.74	60	3.74
168	27/03/2022	09:20:00	3.74	30	7.48
169	03/05/2022	11:50:00	3.75	100	2.25
170	13/05/2022	04:30:00	3.75	70	3.21
171	27/05/2022	10:20:00	3.75	40	5.63
172	14/05/2022	13:10:00	3.93	40	5.90
173	24/03/2022	07:50:00	3.94	30	7.88
174	27/04/2022	07:40:00	3.94	30	7.88

	Data	Hora final	Precipitação total (mm)	Duração (min)	Intensidade (mm/h)
175	13/05/2022	10:30:00	3.94	80	2.96
176	21/03/2022	09:20:00	3.94	30	7.88
177	08/06/2022	23:10:00	4.13	20	12.39
178	23/03/2022	23:50:00	4.13	30	8.26
179	27/03/2022	02:50:00	4.13	20	12.39
180	20/04/2022	13:10:00	4.14	40	6.21
181	06/05/2022	06:30:00	4.33	30	8.66
182	24/05/2022	19:40:00	4.33	50	5.20
183	05/06/2022	09:00:00	4.33	30	8.66
184	17/03/2022	02:40:00	4.33	20	12.99
185	24/06/2022	07:50:00	4.53	60	4.53
186	11/06/2022	18:30:00	4.54	130	2.10
187	06/06/2022	16:40:00	4.55	70	3.90
188	06/06/2022	22:00:00	4.72	50	5.66
189	30/05/2022	22:50:00	4.73	20	14.19
190	20/05/2022	22:10:00	4.92	40	7.38
191	24/03/2022	13:10:00	4.92	20	14.76
192	07/04/2022	03:20:00	4.93	50	5.92
193	27/03/2022	04:50:00	4.93	30	9.86
194	05/03/2022	04:40:00	5.11	110	2.79
195	20/06/2022	03:30:00	5.31	30	10.62
196	13/05/2022	12:20:00	5.32	80	3.99
197	19/03/2022	01:30:00	5.32	20	15.96
198	03/04/2022	11:40:00	5.49	50	6.59
199	18/03/2022	06:00:00	5.72	40	8.58
200	27/05/2022	06:30:00	5.93	60	5.93
201	22/03/2022	06:10:00	5.94	80	4.46
202	02/05/2022	23:30:00	6.1	40	9.15
203	04/06/2022	05:50:00	6.1	120	3.05
204	01/05/2022	22:50:00	6.3	80	4.73
205	24/03/2022	05:20:00	6.34	40	9.51
206	03/05/2022	08:00:00	6.51	30	13.02
207	09/06/2022	05:50:00	6.51	80	4.88
208	22/06/2022	13:50:00	6.68	50	8.02
209	20/04/2022	12:10:00	6.7	30	13.40
210	02/03/2022	04:40:00	6.73	30	13.46
211	05/03/2022	06:00:00	6.89	40	10.34
212	27/05/2022	17:40:00	7.09	40	10.64
213	07/06/2022	00:20:00	7.31	110	3.99
214	22/06/2022	16:20:00	7.49	130	3.46
215	07/06/2022	13:10:00	7.67	70	6.57
216	04/03/2022	22:30:00	8.27	20	24.81
217	31/05/2022	08:40:00	8.47	220	2.31
218	05/03/2022	17:20:00	8.85	100	5.31
219	04/03/2022	16:30:00	8.86	30	17.72

	Data	Hora final	Precipitação total (mm)	Duração (min)	Intensidade (mm/h)
220	06/06/2022	18:30:00	9.04	80	6.78
221	24/04/2022	05:50:00	9.26	20	27.78
222	27/05/2022	13:30:00	9.57	30	19.14
223	29/05/2022	18:20:00	10.23	90	6.82
224	01/06/2022	07:50:00	10.25	60	10.25
225	06/03/2022	02:30:00	10.25	60	10.25
226	28/04/2022	21:10:00	10.26	40	15.39
227	29/06/2022	21:20:00	12.19	210	3.48
228	09/03/2022	11:50:00	12.3	30	24.60
229	29/05/2022	01:30:00	12.8	110	6.98
230	26/05/2022	06:40:00	13.19	130	6.09
231	21/03/2022	22:50:00	13.24	100	7.94
232	22/03/2022	20:00:00	13.49	30	26.98
233	03/04/2022	07:30:00	13.97	110	7.62
234	08/04/2022	12:20:00	14.19	110	7.74
235	11/06/2022	10:00:00	15.18	160	5.69
236	20/04/2022	06:00:00	15.54	150	6.22
237	24/03/2022	09:30:00	15.59	80	11.69
238	30/03/2022	21:40:00	15.69	30	31.38
239	04/06/2022	16:00:00	17.11	110	9.33
240	11/06/2022	14:10:00	17.51	90	11.67
241	11/06/2022	06:40:00	18.38	110	10.03
242	13/05/2022	08:30:00	19.11	90	12.74
243	29/04/2022	14:30:00	19.14	100	11.48
244	22/03/2022	04:20:00	23.95	260	5.53
245	20/05/2022	20:30:00	24.84	90	16.56
246	03/04/2022	05:10:00	26.86	80	20.15
247	20/06/2022	09:50:00	30.3	250	7.27
248	25/05/2022	16:40:00	30.91	510	3.64
249	03/06/2022	11:40:00	31.02	140	13.29
250	28/05/2022	01:00:00	31.67	360	5.28
251	20/04/2022	10:10:00	34.23	230	8.93
252	24/05/2022	00:50:00	35.99	180	12.00
253	05/03/2022	22:00:00	36.46	150	14.58
254	23/05/2022	20:40:00	37.62	190	11.88
255	22/06/2022	07:20:00	39.97	190	12.62
256	22/03/2022	14:50:00	40.74	140	17.46
257	25/05/2022	02:10:00	43.85	360	7.31
258	25/05/2022	07:20:00	46.89	290	9.70
259	06/03/2022	08:30:00	54.16	230	14.13
260	22/06/2022	22:20:00	59.51	250	14.28
261	07/06/2022	11:30:00	62.25	590	6.33
262	28/05/2022	15:40:00	200.03	860	13.96

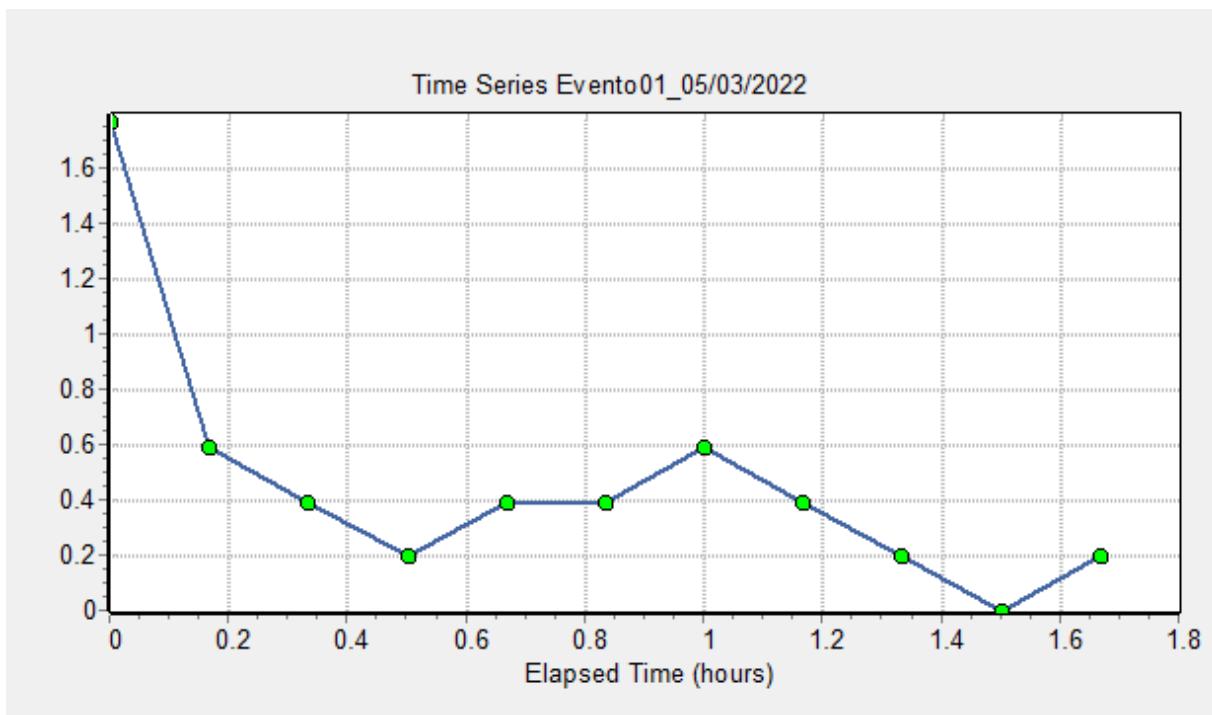
APÊNDICE D – Parâmetros dos barris de chuva utilizados no SWMM

Tabela D.1 - Parâmetros de entrada utilizados para as sub-bacias no modelo SWMM.

Barril de chuva	Volume calculado (m^3)	Volume (m^3)	Altura do barril (mm)	Área (m^2)	W (m)	Cobertura	Diâmetro do dreno (mm)	Coeficiente de fluxo	Expoente de fluxo	Offset (mm)	Área permeável tratada	Área impermeável tratada
BC 2,5	2,4224	2,5	2000	1,25	1,261566261	Sim	19,05	68,6988325	0,5	1950	0%	100%
BC 7,5	7,1497	7,5	2000	3,75	2,185096861	Sim	19,05	22,89961083	0,5	1950	0%	100%
BC 8,5	8,2064	8,5	2000	4,25	2,326213246	Sim	19,05	20,20553897	0,5	1950	0%	100%
BC 10,0	9,8555	10	2000	5	2,523132522	Sim	19,05	17,17470813	0,5	1950	0%	100%

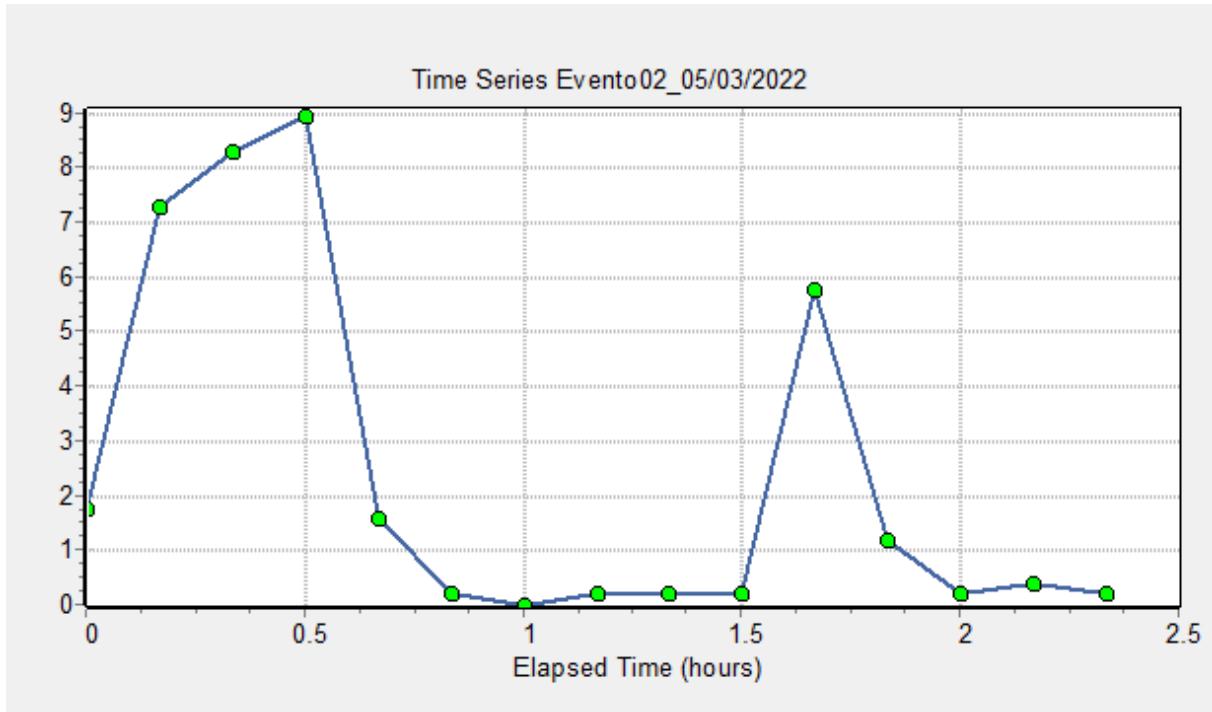
APÊNDICE E – Representação Gráfica dos Eventos de Chuva Utilizados na Modelagem

Figura E.1 - Evento pluviométrico do dia 05/03/2022 (Evento 01).



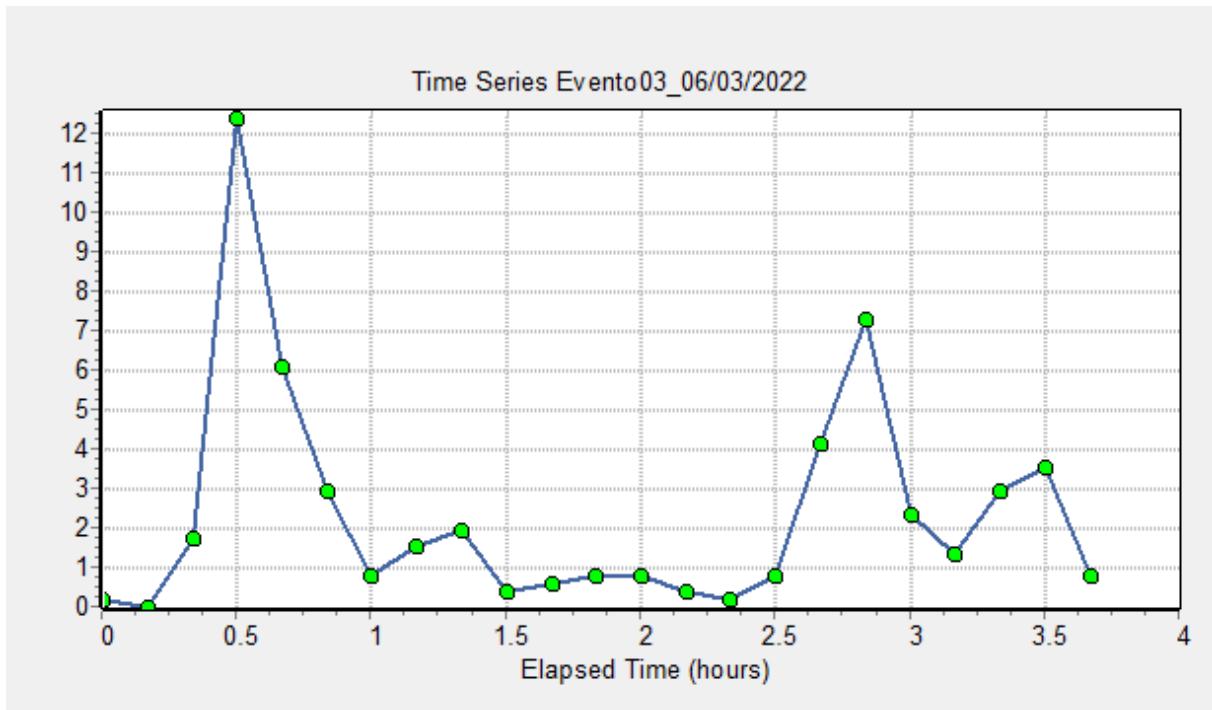
Fonte: A autora (2025).

Figura E.2 - Evento pluviométrico do dia 05/03/2022 (Evento 02).



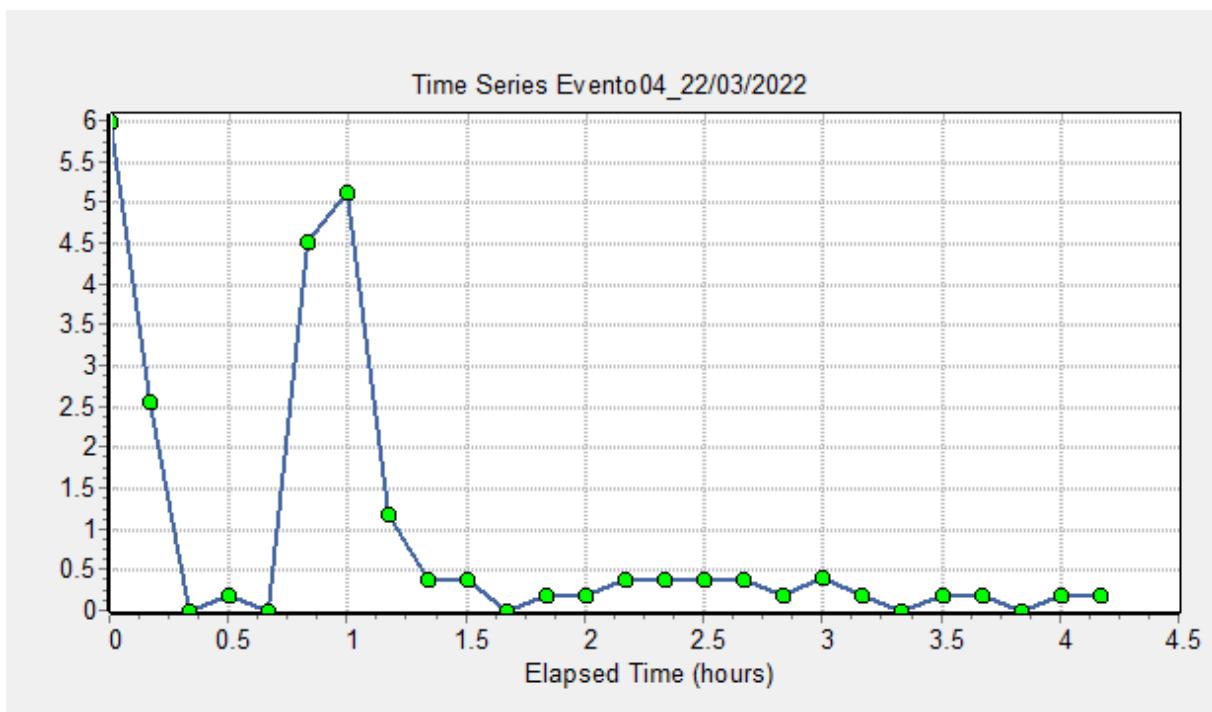
Fonte: A autora (2025).

Figura E.3 - Evento pluviométrico do dia 06/03/2022 (Evento 03).



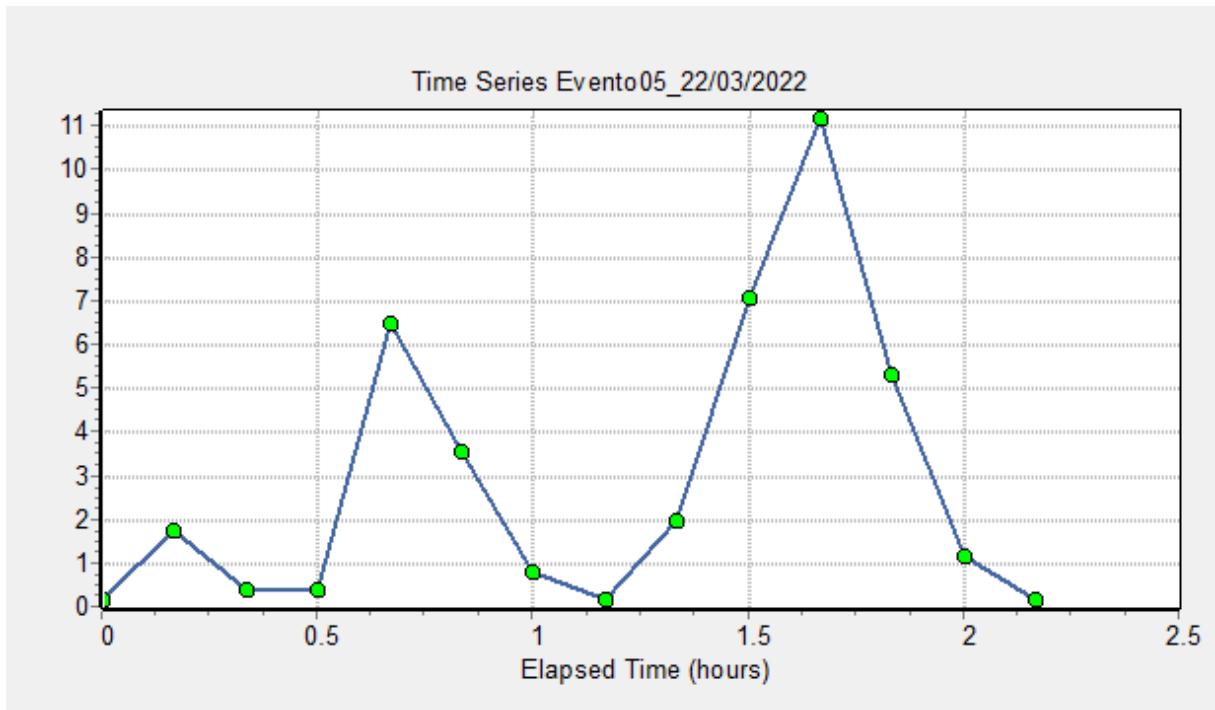
Fonte: A autora (2025).

Figura E.4 - Evento pluviométrico do dia 22/03/2022 (Evento 04).



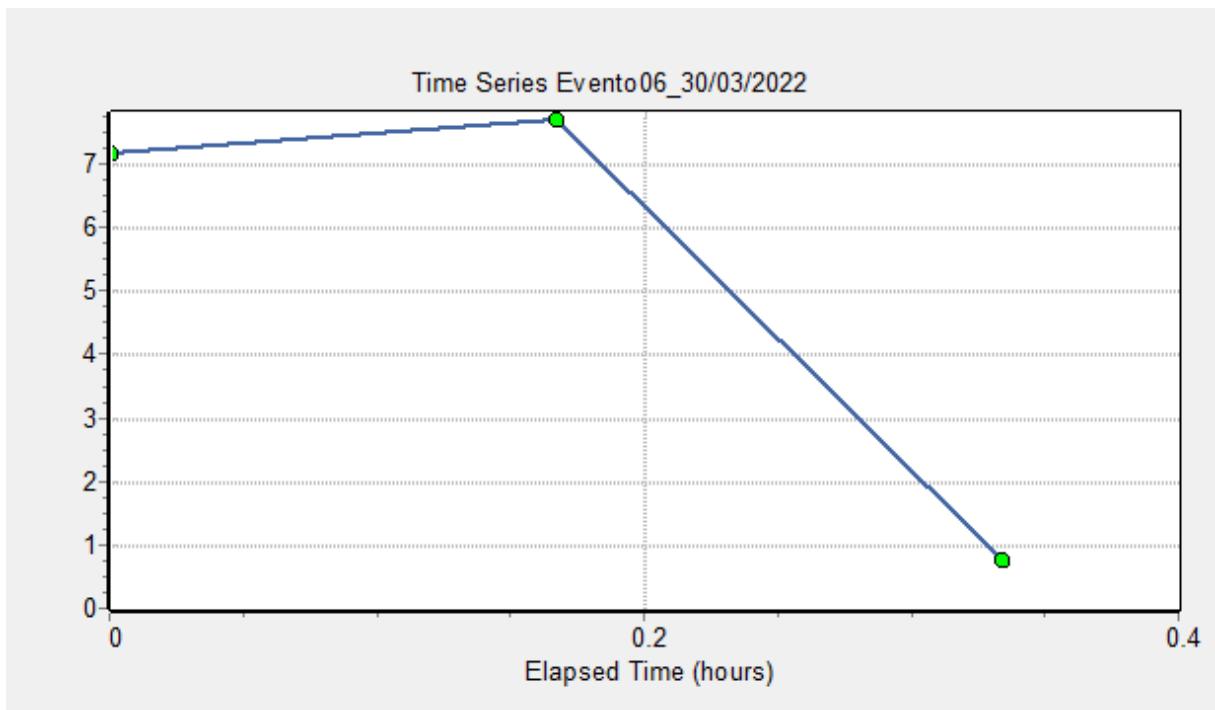
Fonte: A autora (2025).

Figura E.5 - Evento pluviométrico do dia 22/03/2022 (Evento 05).



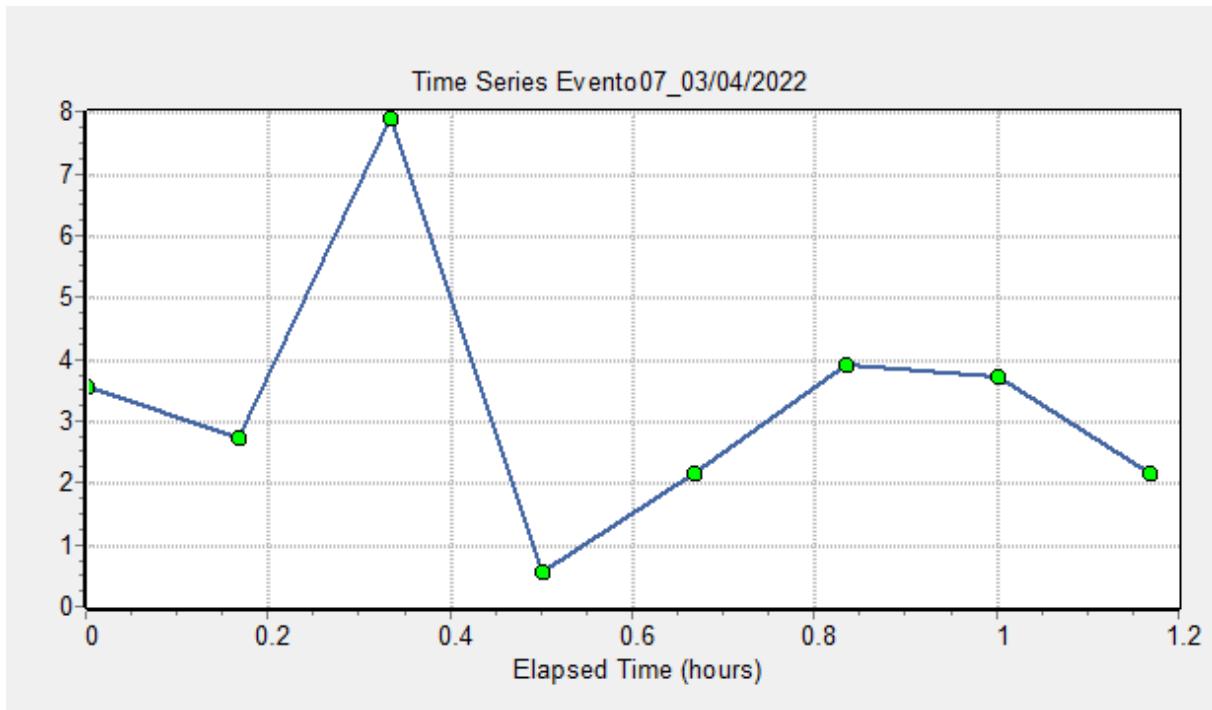
Fonte: A autora (2025).

Figura E.6 - Evento pluviométrico do dia 30/03/2022 (Evento 06).



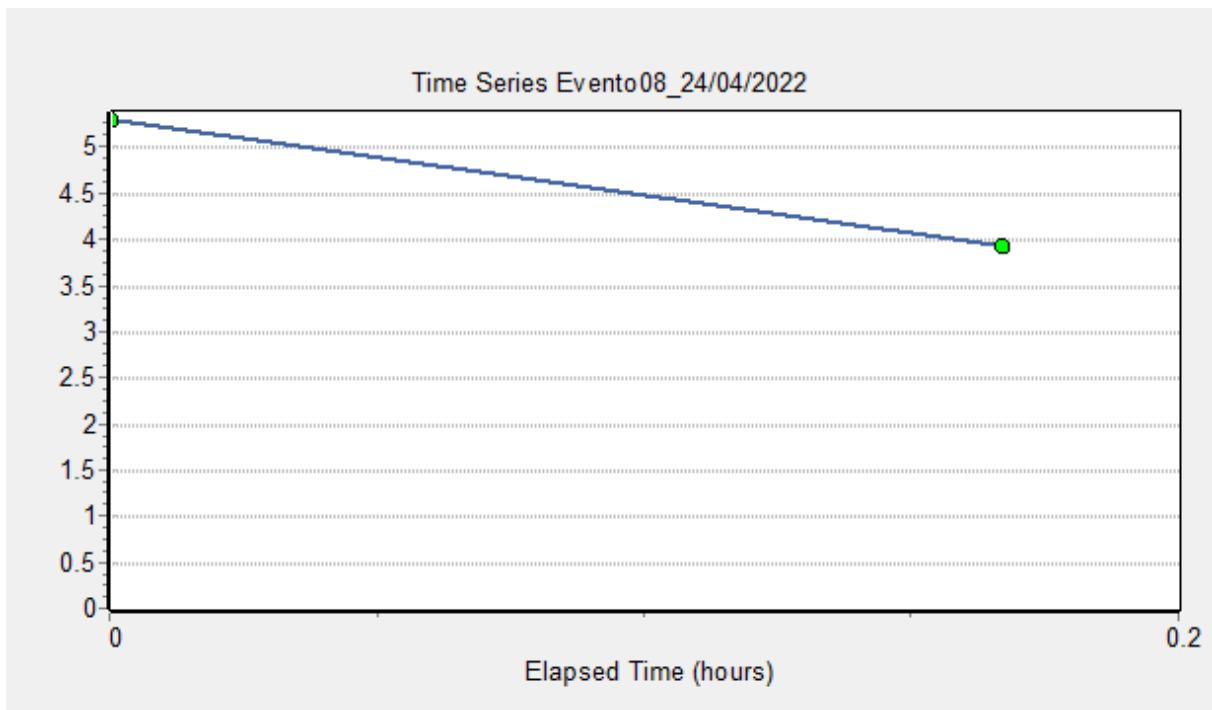
Fonte: A autora (2025).

Figura E.7 - Evento pluviométrico do dia 03/04/2022 (Evento 07).



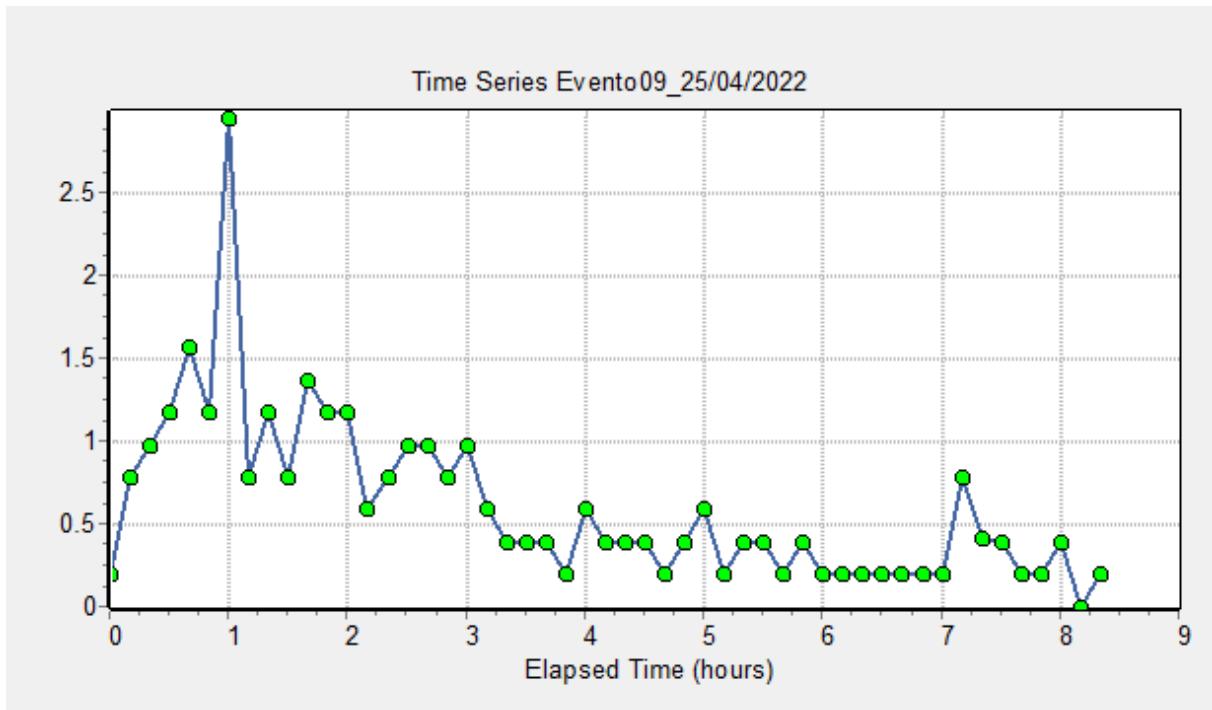
Fonte: A autora (2025).

Figura E.8 - Evento pluviométrico do dia 24/04/2022 (Evento 08).



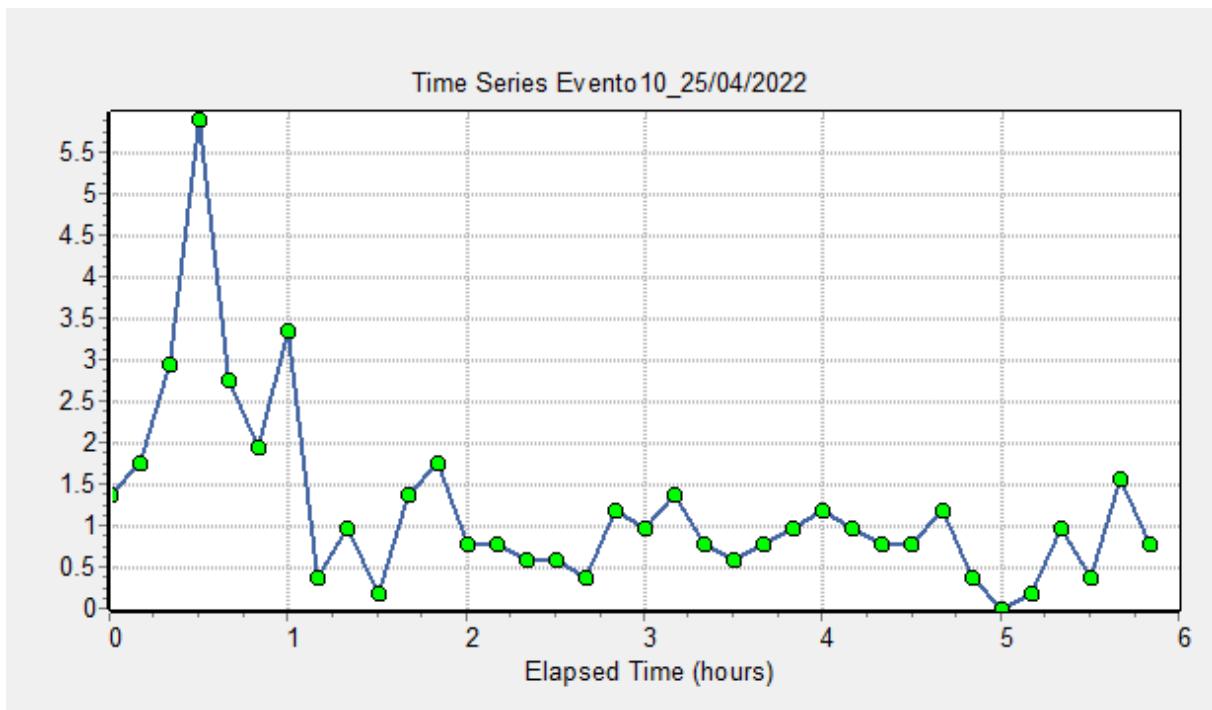
Fonte: A autora (2025).

Figura E.9 - Evento pluviométrico do dia 25/04/2022 (Evento 09).



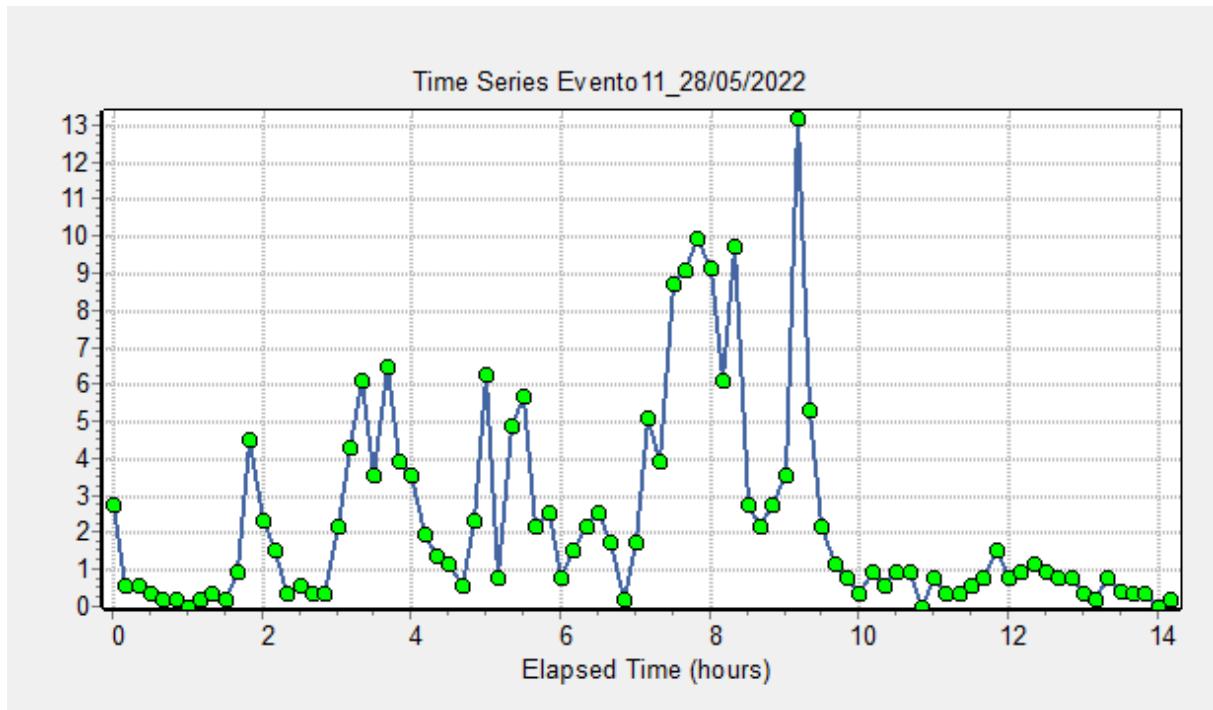
Fonte: A autora (2025).

Figura E.10 - Evento pluviométrico do dia 25/04/2022 (Evento 10).



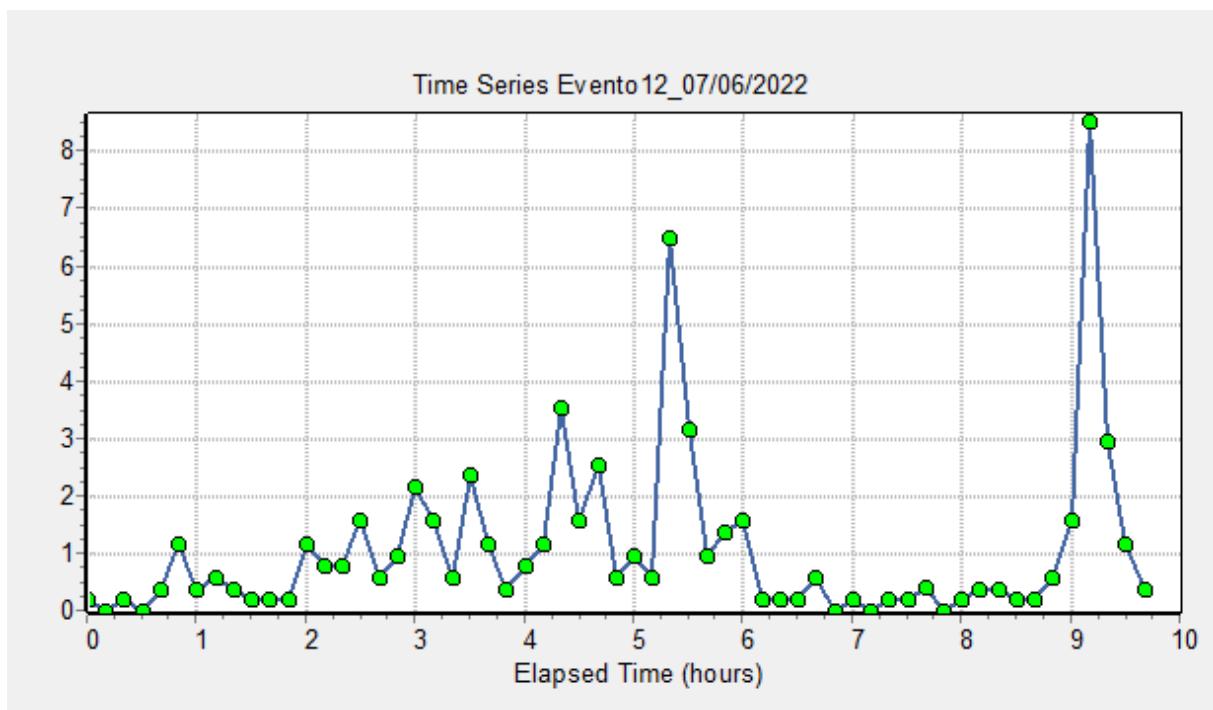
Fonte: A autora (2025).

Figura E.11 - Evento pluviométrico do dia 28/05/2022 (Evento 11).



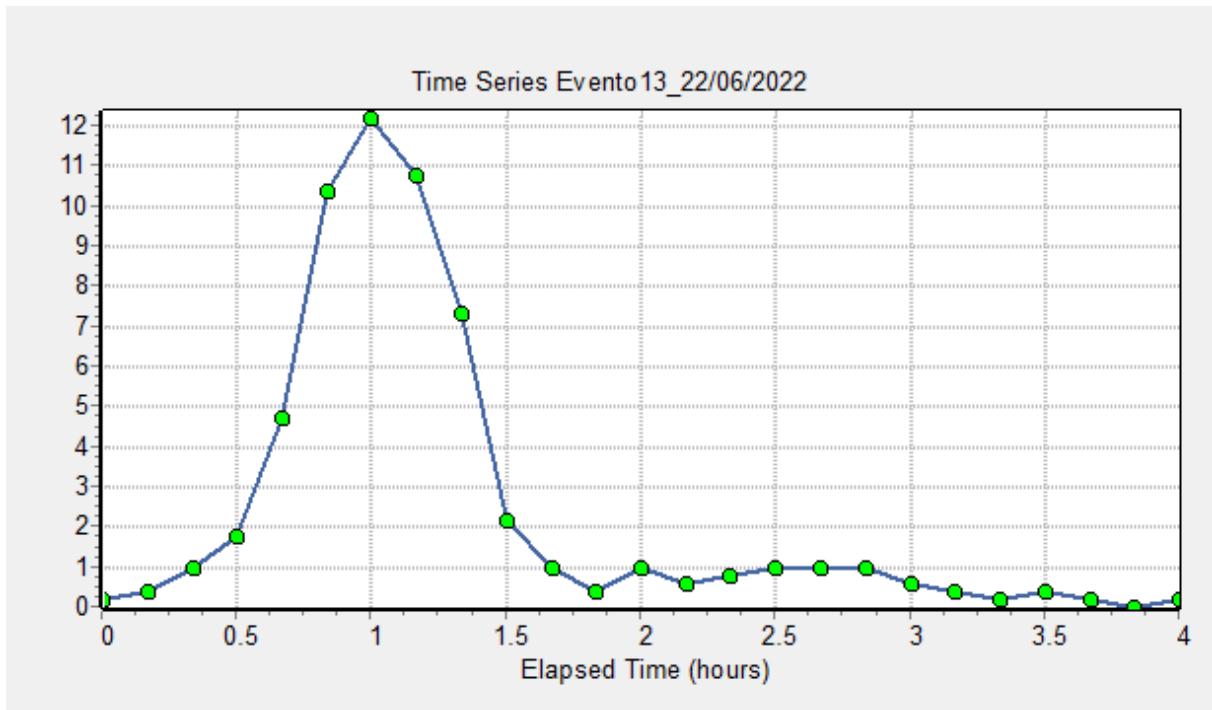
Fonte: A autora (2025).

Figura E.12 - Evento pluviométrico do dia 07/06/2022 (Evento 12).



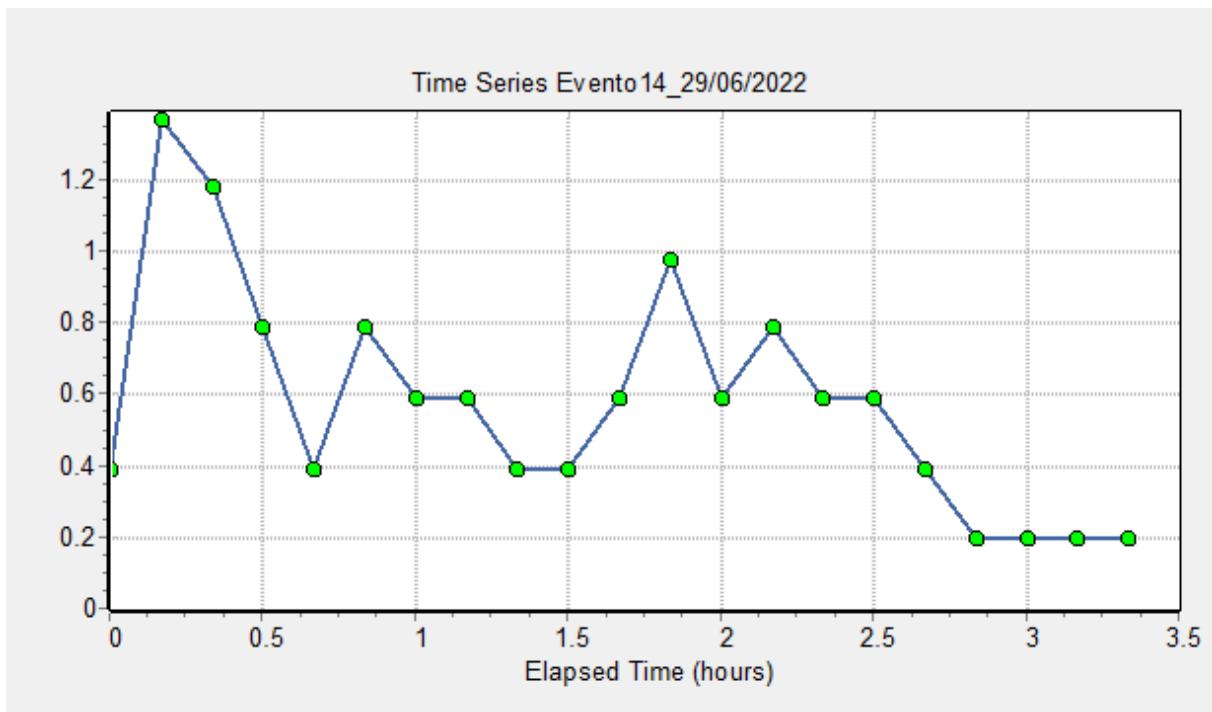
Fonte: A autora (2025).

Figura E.13 - Evento pluviométrico do dia 22/06/2022 (Evento 13).



Fonte: A autora (2025).

Figura E.14 - Evento pluviométrico do dia 29/06/2022 (Evento 14).



Fonte: A autora (2025).