



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA ZONA SUL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

ANA CAROLINE NASCIMENTO ALVARENGA

**JARDINS DE CHUVA COMO FERRAMENTA DE MITIGAÇÃO DE RISCOS
HIDROLÓGICOS NA SUB-BACIA PD12, TERESINA, PIAUÍ**

**TERESINA
2025**

ANA CAROLINE NASCIMENTO ALVARENGA

JARDINS DE CHUVA COMO FERRAMENTA DE MITIGAÇÃO DE RISCOS
HIDROLÓGICOS NA SUB-BACIA PD12, TERESINA, PIAUÍ

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina
Zona Sul.

Orientador: Prof. Dr. Mauro César de Brito Sousa

TERESINA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Alvarenga, Ana Caroline Nascimento

A473j Jardins de chuva como ferramenta de mitigação de riscos hidrológicos na sub-bacia PD12, Teresina, Piauí / Ana Caroline Nascimento Alvarenga. - 2025. 60 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Zona Sul, 2025.

Orientador : Prof Dr. Mauro César de Brito Sousa.

1. Jardins de Chuvas. 2. Drenagem Urbana. 3. Escoamento Superficial. 4. LIDs. I.Título.

CDD - 624

Elaborado por Rudney do Carmo Paz CRB 3/1117

ANA CAROLINE NASCIMENTO ALVARENGA

JARDINS DE CHUVA COMO FERRAMENTA DE MITIGAÇÃO DE RISCOS
HIDROLÓGICOS NA SUB-BACIA PD12, TERESINA, PIAUÍ

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina
Zona Sul.

Aprovada em: 21 / 01 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mauro César de Brito Sousa (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Ailton Soares Freire
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Israel de Oliveira Costa
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Aos meus pais e à minha avó, que me deram suas asas para que eu pudesse alcançar tudo o que conquistei.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, que me deu forças e discernimento durante toda essa jornada. Quando tudo parecia escuridão, recorrer a Ele era a certeza de encontrar uma luz e uma resposta.

À minha amada família, meu porto seguro, meus exemplos de vida, Mário e Rosana. Vocês, que abdicam da própria vida para dar o melhor para mim e meus irmãos, sou eternamente grata pelo amor e companheirismo, por sempre acreditarem em mim, mesmo quando eu mesma não acreditava. Vocês que me apoiaram em cada decisão e vibraram comigo em cada conquista. Tudo é por vocês. Agradeço a Deus todos os dias por ter me dado pais tão maravilhosos. Amo vocês mais do que palavras podem expressar.

À minha mãe, Francisca, que mesmo de longe, sempre me apoiou e torceu pelo meu sucesso. Sou eternamente grata a você.

À minha amada avó, Eunice Ibiapina, um exemplo de mulher forte e batalhadora. Você que sempre esteve ao meu lado, em todos os momentos. Você me deu colo, carinho e grandes ensinamentos, celebrando cada conquista minha como se fosse sua. Você é minha história, minha raiz e meu exemplo de vida. Agradeço a Deus por ser sua neta. Amo você.

À minha querida irmã Alanna, minha prima Larissa, que é como uma irmã para mim, e aos meus queridos irmãos Adail e Mário Filho, meus companheiros de vida. Agradeço a vocês por cada abraço, cada risada, cada briga, cada palavra de apoio, e por serem esses irmãos tão prestativos e humanos. Sou grata a Deus por ser irmã de vocês.

Aos meus sobrinhos, Aurora e Gael, os amores da minha vida, minha felicidade diária. Vocês são minha luz em momentos escuros. Sou abençoada por Deus por ter duas crianças tão especiais em minha vida. Amo vocês do fundo do meu coração.

Ao meu namorado, Rafael, que esteve comigo durante toda essa jornada. Minha

eterna gratidão por ser minha família quando a minha não podia estar presente fisicamente. Agradeço a Deus por ter você na minha vida e por ser esse homem tão coração e paciente comigo. Sou eternamente grata por você. Amo você.

À família dos Anjos Ribeiro, Zilda, Washington, Maria José e Núbia, vocês são minha família também.

Aos meus grandes parceiros de curso e da vida, Débora e Geraldo, agradeço por estarem comigo desde o início e por serem a leveza de um curso tão difícil. Vocês foram meus pés e mãos nessa grande jornada que vivemos com grande maestria e sucesso. Desejo a vocês o sucesso que merecem e que trilhem as melhores coisas dessa vida.

Aos meus amigos de vida e de curso, agradeço por estarem presentes nessa caminhada tão importante. O apoio de vocês foi fundamental para seguir adiante.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Ailton Freire e Prof. Me. Israel Costa, pela disponibilidade, paciência, pela leitura cuidadosa e pelas excelentes contribuições.

Por fim, e não menos importante, ao meu orientador, Prof. Dr. Mauro César, uma pessoa que contribuiu muito na minha jornada acadêmica. Obrigada, Professor, por todo ensinamento, cuidado, paciência, por não ter desistido de mim!

Se uma ferramenta está cega e não for afiada, será preciso
fazer muito esforço. Mas a sabedoria ajuda a obter sucesso

Eclesiastes 10:10

RESUMO

A presente pesquisa propõe analisar o uso de Jardins de Chuva como Soluções de Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (LIDs) na sub-bacia hidrográfica PD12, por meio do software SWMM. Planeja-se conduzir uma pesquisa bibliográfica para avaliar a eficácia desses jardins na gestão de águas pluviais. A análise envolverá a aplicação do SWMM para simular o comportamento hidrológico da bacia com a implementação dos jardins de chuva. Os resultados esperados apontam para a potencial eficiência dessas soluções na redução do escoamento superficial e na minimização dos impactos das chuvas, visando oferecer informações relevantes sobre o potencial do Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (LIDs) na gestão sustentável das águas pluviais em ambientes urbanos na cidade de Teresina.

Palavras-chave: Jardins de Chuvas; Drenagem Urbana; Escoamento Superficial; LIDs.

ABSTRACT

This research aims to analyze the use of rain gardens as Low Impact Urban Development Solutions (LIDs) in the PD12 sub-watershed, using the SWMM software. It is planned to conduct a literature search to assess the effectiveness of these gardens in stormwater management. The analysis will involve applying SWMM to simulate the hydrological behavior of the basin with the implementation of rain gardens. The expected results point to the potential efficiency of these solutions in reducing surface runoff and minimizing the impacts of rainfall, in order to provide relevant information on the potential of Low Impact Urban Development Solutions (LIDs) in the sustainable management of rainwater in urban environments in the city of Teresina.

Keywords: Rain Gardens; Urban Drainage; Surface Runoff; LIDs.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Ciclo Hidrológico	21
Figura 2- Relação entre superfícies impermeabilizadas e escoamento superficial. ..	21
Figura 3- Comparativo entre as denominações de Drenagem Sustentável.	24
Figura 4- Estrutura básica de um jardim de chuva	26
Figura 5- Implantação de Jardins de Chuva em passeios.....	28
Figura 6- Jardins de Chuva na cidade de São Paulo	30
Figura 7- Fluxograma do processo de modelagem com SWMM.....	34
Figura 8- Localização da Sub-bacia PD12	37
Figura 9- Hietogramas obtidos a partir da Curva IDF de Teresina-PI.	40
Figura 10- Comparação do Escoamento Superficial com TR de 2, 5 e 10 anos: Cenário 1, sem LID	45
Figura 11- Comparação do Escoamento Superficial com TR de 2 anos: Sem LID (Cenário 1) e Com LID (Cenário 2).	46
Figura 12- Comparação do Escoamento Superficial com TR de 5 anos: Sem LID (Cenário 1) e com LID (Cenário 2).	48
Figura 13- Comparação do Escoamento Superficial com TR de 10 anos: Sem LID (Cenário 1) e com LID (Cenário 2).	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características fisiográficas da bacia	38
Tabela 2- Valores do parâmetro tempo de concentração por sub-bacia de drenagem para o cenário de prognóstico.	39
Tabela 3- Dados de cada camada utilizada na simulação de jardins de chuva.	41
Tabela 4- Resultados Complementares TR 2 anos.....	47
Tabela 5- Resultados Complementares TR 5 anos.....	49
Tabela 6- Resultados Complementares TR 10 anos.....	51
Tabela 7- Orçamento de Jardim de Chuva com dimensões de 4m ²	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LID	Low Impact Development
SWMM	Storm Water Management Model
PD12	Sub-bacia PD12
TR	Tempo de Retorno
USGS	United States Geological Survey
GI	Green Infrastructure
BPM	Business Process Management
SUDS	SUDS
EPA	Environmental Protection Agency
PDDrU	Plano Diretor de Drenagem Urbana
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
CN	Curve Number
SDU	Sustainable Drainage Unit

LISTA DE SÍMBOLOS

t_c	Tempo de Concentração
L	Comprimento do talvegue
S	Declividade
A_{imp}	Área Impermeável
I	Intensidade da Chuva
t	Tempo de duração
n	Coefficiente de Manning
I_{loss}	Perda por Infiltração
Q	Vazão
$\%$	Porcentagem
m^2	Metro Quadrado
min	Minutos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS.....	19
a) Objetivo geral	19
b) Objetivos específicos	19
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
3.1 RISCOS HIDROLÓGICOS EM ÁREAS URBANAS.....	20
3.1.1 CAUSAS E IMPACTOS DOS RISCOS HIDROLÓGICOS EM ÁREAS URBANAS.....	20
3.2 DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL E TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS	22
3.2.1 CONCEITO E EVOLUÇÃO DE DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL.	23
3.2.2 JARDINS DE CHUVA.....	25
3.2.2.1 APLICAÇÃO DE JARDINS DE CHUVA EM ÁREAS URBANAS	27
3.3 VIABILIDADE ECONÔMICA DOS JARDINS DE CHUVA	31
3.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA JARDINS DE CHUVA	33
3.4.1 Utilização do EPA SWMM na Simulação Hidrológica	33
4 METODOLOGIA	35
4.1 ÁREA DE ESTUDO	37
4.1.2 CARACTERÍSTICAS DA SUB-BACIA PD12 EM TERESINA	37
4.1.1 LOCAIS PARA IMPLANTAÇÃO DOS JARDINS DE CHUVA	38
4.2 DADOS DE PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO.....	39
4.3 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DOS JARDINS DE CHUVA NO EPA SWMM..	41
4.3.1 PARÂMETROS UTILIZADOS NA MODELAGEM DE JARDINS DE CHUVA	41
4.4 DIMENSIONAMENTO DOS JARDINS DE CHUVA.....	44
4.5 VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLEMENTAÇÃO	44

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
5.1	SIMULAÇÃO COM O TEMPO DE RETORNO (TR) DE 2 ANOS.....	46
5.2	SIMULAÇÃO COM O TEMPO DE RETORNO (TR) DE 5 ANOS.....	47
5.3	SIMULAÇÃO COM O TEMPO DE RETORNO (TR) DE 10 ANOS.....	49
5.4	ANÁLISE GERAL: COMPARATIVOS ENTRE OS TR 2, 5 E 10 ANOS	51
5.5	VIABILIDADE ECONÔMICA DOS JARDINS DE CHUVA	52
6.0	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
	REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

A rápida expansão das áreas urbanas desde a segunda metade do século XX trouxe profundas transformações na paisagem e na gestão dos recursos hídricos, especialmente em cidades onde a infraestrutura de drenagem urbana não acompanhou o ritmo de urbanização. A falta de planejamento no manejo de águas pluviais, associada ao aumento de áreas impermeáveis, exacerbou problemas de escoamento superficial, causando alagamentos, erosão do solo e a degradação da qualidade das águas.

Apesar dos avanços na implementação de Planos Diretores, ainda há dificuldades em integrar soluções sustentáveis de gestão hídrica no planejamento urbano. Esse cenário se torna particularmente crítico em países em desenvolvimento, como o Brasil. Dessa forma, isso pode comprometer os esforços para mitigar os impactos ambientais e melhorar a qualidade de vida nas áreas urbanas. (Tucci, 2010; Chocat et al., 2001; Fernandes et al., 2022).

Em resposta a esses desafios, novas abordagens de drenagem com foco na sustentabilidade têm ganhado crescente relevância tanto na literatura quanto na prática urbana. Um exemplo disso são as Medidas de Drenagem Urbana Sustentável (Sustainable Urban Drainage Systems - SUDS), que englobam um conjunto de técnicas e metodologias voltadas para a redução dos impactos das inundações, a preservação do ciclo hidrológico natural e o fortalecimento da resiliência das cidades frente aos eventos climáticos extremos. (Brown e Mijic, 2019; Yang et al., 2020; Fletcher et al., 2015).

Entre as abordagens de SUDS, destaca-se o conceito de Desenvolvimento de Baixo Impacto (Low Impact Development - LID), adotado principalmente na América do Norte e Nova Zelândia. Esta estratégia visa à implementação de práticas de tratamento em pequena escala, promovendo a infiltração da água no solo e a recarga dos aquíferos, além de aprimorar a qualidade das águas pluviais.

Segundo Souza (2012) e Kourtis et al. (2018), o LID oferece uma alternativa resiliente, adaptando a paisagem urbana ao comportamento hidrológico local e promovendo o uso responsável dos recursos hídricos. Essas práticas refletem uma tendência crescente de infraestrutura verde, que alia o desenvolvimento urbano à proteção dos ecossistemas aquáticos e terrestres.

Os jardins de chuva, uma das práticas de LID, emergem como uma técnica eficiente para o manejo sustentável de águas pluviais, oferecendo vantagens tanto

ecológicas quanto sociais. De acordo com Waschbusch, Selbig e Bannerman (2019), essa técnica permite a captura do escoamento superficial, promovendo a infiltração de água e a remoção de contaminantes antes que a água alcance rios e córregos urbanos.

Além disso, estudos recentes mostram que os jardins de chuva podem contribuir para a melhoria da qualidade da água, reduzir o volume de escoamento e até fornecer benefícios estéticos e recreativos em áreas urbanas (Li et al., 2021; Dagenais et al., 2020; Barbosa et al., 2012). Esses benefícios tornam os jardins de chuva uma solução eficaz e sustentável para lidar com as questões relacionadas à drenagem urbana, além de promoverem uma integração entre infraestrutura e meio ambiente nas cidades.

Para avaliar a eficácia desta solução, este estudo empregará o Storm Water Management Model (SWMM), uma ferramenta desenvolvida pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) que é amplamente utilizada para simular o comportamento hidráulico e hidrológico de águas pluviais em áreas urbanas. O SWMM fornece modelagem precisa de fluxos de água dentro de redes de drenagem e suas respostas a vários cenários de intervenção, como a incorporação de infraestrutura verde (Rossman, 2015; EPA, 2021).

Ao alavancar o SWMM, o estudo conduzirá uma análise detalhada do impacto dos jardins de chuva na sub-bacia PD12, localizada na região leste de Teresina, Piauí. A pesquisa focará em fatores como infiltração, redução do escoamento superficial, recarga do aquífero e a eficiência dessas soluções em áreas urbanas, visando promover a sustentabilidade e melhorar a gestão das águas pluviais.

Dada a vulnerabilidade da área a inundações, esta pesquisa busca avaliar não apenas a eficiência dos jardins de chuva como uma solução de drenagem sustentável, mas também suas implicações sociais e a percepção da comunidade sobre esta abordagem. As descobertas podem servir de base para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas ao controle de inundações e à adaptação dos espaços urbanos ao ciclo hidrológico natural.

2 OBJETIVOS

a) Objetivo geral

Avaliar o uso de Soluções de Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (LIDs) do tipo jardim de chuva na bacia hidrográfica PD12, na cidade de Teresina, Piauí, observando os efeitos de sua implementação na mitigação de deflúvios urbanos.

b) Objetivos específicos

- Modelar hidrologicamente o comportamento da bacia urbana em loteamentos presentes na Sub-bacia PD12 em Teresina-PI sem a presença de Jardins de Chuva (Cenário 01), utilizando o software SWMM.
- Modelar hidrologicamente o comportamento da bacia urbana em em loteamentos presentes na Sub-bacia PD12 com a presença de Jardins de Chuva (Cenário 02), utilizando o software SWMM.
- Comparar os resultados gerados com e sem a presença de LID, avaliando os impactos de escoamento superficial e de riscos hidrológicos.
- Discutir a viabilidade econômica da implementação de Jardins de Chuva, examinando suas vantagens e objeções.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 RISCOS HIDROLÓGICOS EM ÁREAS URBANAS

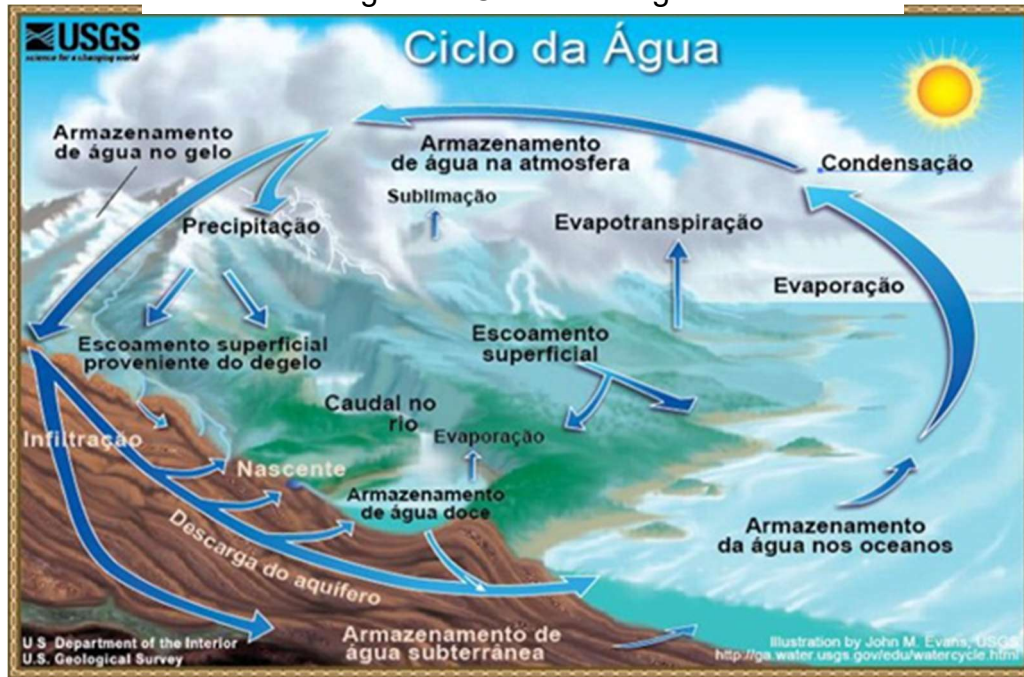
3.1.1 CAUSAS E IMPACTOS DOS RISCOS HIDROLÓGICOS EM ÁREAS URBANAS

Para investigar e compreender as causas e os impactos dos riscos hidrológicos, é fundamental possuir compreensão do ciclo hidrológico no âmbito geral da pesquisa em hidrologia¹. Segundo Bigarella, J.J. (1990), o ciclo hidrológico é descrito como “as relações entre as várias formas do comportamento das águas em um ciclo fechado”, caracterizando-se não apenas como uma simples sequência de processos, mas sim como um conjunto de fases que representam os diversos percursos pelos quais a água circula na natureza.

Segundo Lima, W.P. (2008), “o ciclo da água envolve vários e complicados processos hidrológicos: evaporação, precipitação, interceptação, transpiração, infiltração, percolação, escoamento superficial”. Destarte, pode-se adicionar ainda o processo de escoamento subsuperficial como um dos processos hidrológicos do ciclo da água. Desse modo, a representação do ciclo hidrológico pode ser ilustrada da seguinte forma (Figura 1):

¹ A hidrologia é a ciência que lida com as águas da Terra, sua ocorrência no tempo e espaço, suas interações com o ambiente físico e biológico e sua resposta às atividades humanas. (Mays, 2005)

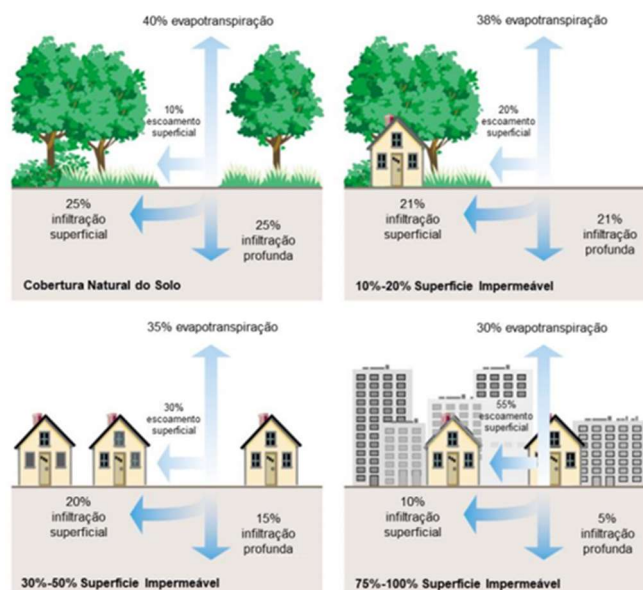
Figura 1- Ciclo Hidrológico



Fonte: USGS (United States Geological Survey) (2010).

Esse ciclo ocorre naturalmente, mas intervenções humanas em certas etapas podem alterá-lo significativamente. Com a crescente urbanização, essas interferências tornaram-se descontroladas, resultando na substituição de grandes áreas de solo natural por superfícies impermeáveis, como asfalto e concreto, o que limita drasticamente a infiltração e favorece o escoamento superficial. De acordo com, SILVA e AMARAL (2019) a substituição de vegetação por infraestrutura urbana afeta a capacidade de recarga de aquíferos, prejudicando o ciclo hidrológico local e ampliando a vulnerabilidade a eventos extremos, como enchentes e alagamentos.

Figura 2- Relação entre superfícies impermeabilizadas e escoamento superficial.



Fonte: CONTE; CANTIERI, MATOS; LOPEZ (2022).

Além das causas diretas, mudanças climáticas têm ampliado os riscos hidrológicos² ao alterar padrões de precipitação. DE VASCONCELOS (2023) observa que eventos de chuvas concentradas estão se tornando mais frequentes, sobrecarregando sistemas de drenagem e intensificando inundações. Essas mudanças também afetam a resiliência das infraestruturas urbanas, que muitas vezes não foram projetadas para lidar com extremos climáticos.

A transformação da chuva em escoamento superficial está diretamente relacionada à capacidade do solo de absorver a água precipitada. A supressão da vegetação e a impermeabilização do solo reduzem essa capacidade, aumentando significativamente a geração da vazão de pico em eventos de precipitação intensa. A vegetação atua como um amortecedor natural, promovendo a infiltração e reduzindo a velocidade do escoamento.

No entanto, com a urbanização crescente e a expansão de áreas pavimentadas, a água escoar mais rapidamente para os sistemas de drenagem, elevando o risco de enchentes e sobrecarga hidráulica (SILVA et al., 2021). A remoção da vegetação natural é outro fator que exacerba os riscos hidrológicos. Quando a cobertura vegetal é removida, principalmente para dar lugar a áreas urbanizadas, os impactos negativos são sentidos diretamente em forma de enchentes e erosões (CASTELLAR et al., 2021). Ademais, a degradação ambiental associada à urbanização também contribui para a poluição de corpos d'água, reduzindo a qualidade da água disponível.

Por fim, a interação entre as causas dos riscos hidrológicos evidencia a necessidade de uma abordagem integrada que combine soluções técnicas e políticas públicas para mitigar os impactos. A implementação de práticas sustentáveis, como jardins de chuva e pavimentos permeáveis, é um exemplo de como é possível reverter parcialmente os efeitos negativos da urbanização (GOMES e ROCHA, 2022).

3.2 DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL E TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS

² Risco hidrológico é produto da probabilidade de falha de uma estrutura hidráulica face à ocorrência de chuva, vazão ou nível da água superior àquela para a qual foi dimensionada e do prejuízo decorrente da falha.

3.2.1 CONCEITO E EVOLUÇÃO DE DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL

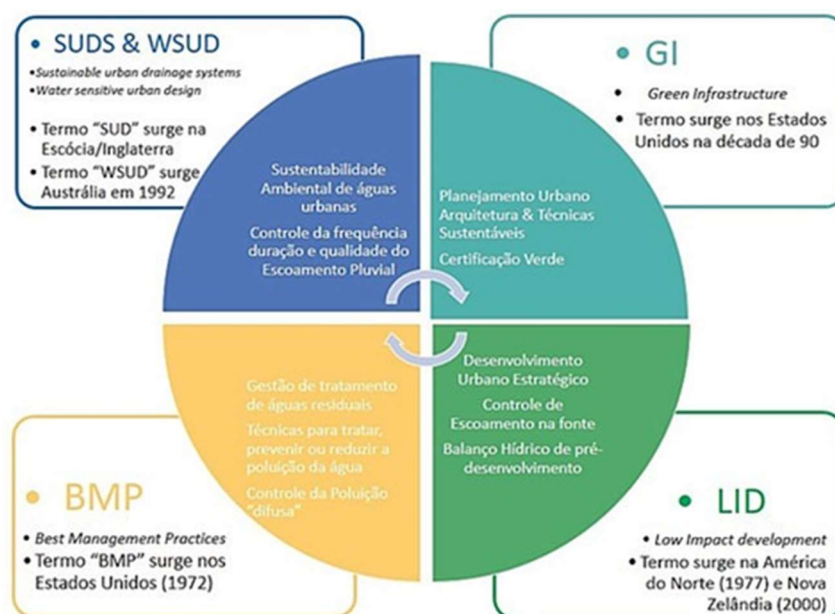
Em consequências dos impactos causados pela desestabilização do ciclo hidrológico natural, provocados principalmente pelo crescimento urbano desordenado, a drenagem urbana sustentável emerge como uma forma de mitigar a problemática. Diferente dos sistemas convencionais, que priorizam o rápido escoamento das águas, essa abordagem integra processos naturais como controle na fonte, infiltração e tratamento das águas pluviais por meio de canalizações. Segundo Tucci (2008), ela reduz os impactos da urbanização no meio ambiente, oferecendo uma gestão mais eficiente e sustentável frente aos desafios climáticos e urbanos.

Em termos históricos, a drenagem urbana evoluiu de sistemas estáticos e centralizados para modelos mais flexíveis e sustentáveis. Essa transformação foi provocada pela urgência de ajustar as cidades aos efeitos do crescimento demográfico e das mudanças climáticas. Nas décadas de 1970 - 1990, emergiram conceitos importantes como Infraestrutura Verde (GI) e Gerenciamento de Processos de Negócio (BPM), sendo que os que mais se destacaram foram os Sistemas Sustentáveis de Drenagem Urbana (SUDS)³ no Reino Unido e os Sistemas de Drenagem de Impacto Mínimo (LID)⁴ nos Estados Unidos, como ilustrado na Figura 3. Ambos sistemas favorecem a adoção de soluções inspiradas na natureza, como jardins de chuva, pavimentos permeáveis e bacias de retenção, com o objetivo de minimizar os riscos de enchentes e aprimorar a qualidade da água (FLETCHER et al., 2013).

³ Os Sistemas Sustentáveis de Drenagem Urbana (SUDS) têm como objetivo principal a gestão integrada das águas pluviais, buscando replicar os processos naturais de drenagem e promover a sustentabilidade ambiental.

⁴ Os Sistemas de Drenagem de Impacto Mínimo (LID) focam na minimização do impacto ambiental da urbanização, adotando técnicas de drenagem descentralizada para controlar o escoamento das águas pluviais no ponto de origem.

Figura 3- Comparativo entre as denominações de Drenagem Sustentável.



Fonte: GUTIERREZ; RAMOS (2019).

No Brasil, o conceito de Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (LID) é considerado um dos princípios de manejo sustentável das águas pluviais urbanas. Entretanto, para que os municípios possam requisitar recursos da União para projetos nessa área, é exigido que apresentem um Plano de Manejo de Águas Pluviais, emitido pelo Ministério das Cidades, o que garante que as ações estejam previamente planejadas dentro de um contexto abrangente e estratégico.

Os princípios da drenagem urbana sustentável são baseados na descentralização e no manejo das águas pluviais o mais próximo possível de sua origem. Entre esses princípios, destacam-se o controle do escoamento superficial, a valorização da infiltração e a proteção dos recursos hídricos. De acordo com Marcondes (2015), essas técnicas não apenas mitigam os riscos de inundações, mas também promovem a recuperação de áreas degradadas, a conservação da biodiversidade e a melhoria dos espaços urbanos.

Dessa maneira, a drenagem urbana sustentável oferece não apenas benefícios ambientais, mas também vantagens econômicas e sociais. Estudos indicam que soluções como telhados verdes e áreas de retenção, integrantes de infraestruturas verdes, corroboram a reduzir os custos com reparos relacionados a enchentes, além de contribuírem para a melhoria da qualidade de vida em áreas

urbanas. Parafraseando, Tucci⁵ (2008) enfatiza que essas práticas são essenciais em cidades densamente povoadas, onde os sistemas convencionais já não conseguem atender às demandas decorrentes da impermeabilização do solo e do aumento de eventos climáticos extremos.

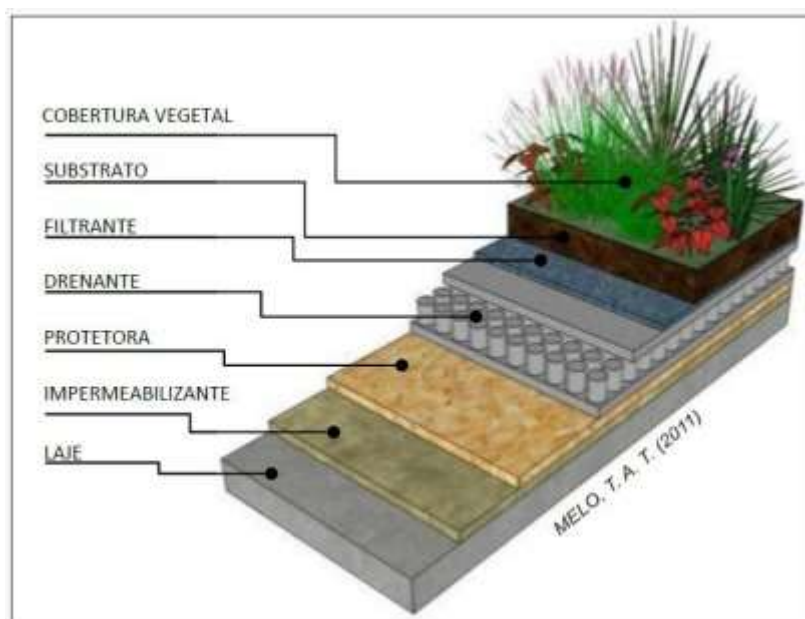
Nessa perspectiva atual, adotar práticas de drenagem urbana sustentável tornou-se indispensável para promover a resiliência e sustentabilidade das cidades. Dessa forma, com a intensificação dos eventos climáticos extremos, soluções baseadas na natureza são fundamentais para equilibrar o crescimento urbano com a preservação ambiental. Sendo assim, a drenagem sustentável vai além de uma abordagem técnica, representando uma estratégia essencial para assegurar a sustentabilidade e a segurança hídrica para as futuras gerações (TUCCI, 2008; FLETCHER et al., 2013).

3.2.2 JARDINS DE CHUVA

Entre as técnicas de Desenvolvimento Urbano de Baixo Custo (LID), os jardins de chuva destacam-se como um importante exemplo de estratégia sustentável. Dessa forma, os jardins de chuva são uma solução inovadora e sustentável para a gestão das águas pluviais em áreas urbanas. Trata-se de depressões rasas no solo, planejadas para capturar e reter o escoamento superficial das chuvas, facilitando sua infiltração no solo. Esses jardins são compostos por camadas de vegetação, substratos porosos e sistemas de drenagem que trabalham em conjunto para filtrar poluentes e reduzir a velocidade do escoamento. De acordo com Castellar et al. (2021), os jardins de chuva são uma alternativa eficaz para a mitigação de problemas relacionados à impermeabilização urbana, como enchentes e degradação hídrica.

⁵ Carlos Eduardo Morelli Tucci é um engenheiro civil e professor titular da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e da Universidade Feevale. Especialista em recursos hídricos, Tucci possui vasta experiência na gestão e conservação de bacias hidrográficas, planejamento urbano sustentável e mitigação de riscos hidrológicos.

Figura 4- Estrutura básica de um jardim de chuva



Fonte: Melo et al (2011).

Um dos principais benefícios dos jardins de chuva é a melhoria da qualidade da água, promovida pela filtragem natural de sedimentos e substâncias nocivas, como óleos, metais pesados e fertilizantes. À medida que a água passa pelas camadas de vegetação e solo, poluentes são retidos, contribuindo para a redução da contaminação em corpos d'água próximos. Além disso, a infiltração da água nesses sistemas auxilia na recarga de aquíferos subterrâneos, um recurso estratégico para o abastecimento hídrico em áreas urbanas e periurbanas (MARTINS et al., 2019).

Outro aspecto relevante é o papel dos jardins de chuva na mitigação de enchentes. Esses sistemas funcionam como reservatórios temporários, absorvendo grandes volumes de água durante eventos de chuva intensa e liberando-a lentamente no solo ou para redes de drenagem. Dessa forma, contribuem para a redução do escoamento superficial e a minimização da sobrecarga nos sistemas pluviais urbanos.

Em estudos de caso analisados por Gomes e Rocha (2022), verificou-se que a implementação de jardins de chuva em bairros densamente urbanizados reduziu os picos de escoamento em até 35%, diminuindo os riscos de alagamentos e erosões. Além disso, a taxa de infiltração da água no solo aumentou em 50%, favorecendo a recarga dos aquíferos e reduzindo a necessidade de escoamento superficial. Os registros indicaram ainda uma queda de até 40% na frequência de pontos críticos de alagamento nas regiões onde essas infraestruturas foram

implementadas, evidenciando sua eficácia na mitigação dos impactos hidrológicos da urbanização.

Além dos benefícios hidrológicos, os jardins de chuva também contribuem para o aumento da biodiversidade urbana. Ao incorporar vegetação nativa e espécies adaptadas ao clima local, esses espaços tornam-se habitat para insetos polinizadores, aves e outros organismos, fortalecendo os ecossistemas urbanos. Essa abordagem também tem impacto estético e educacional, incentivando a conscientização sobre a importância da conservação ambiental em áreas urbanizadas (CASTELLAR et al., 2021).

Outra vantagem significativa dos jardins de chuva é sua capacidade de reduzir as ilhas de calor urbanas. A vegetação e o solo permeável ajudam a regular a temperatura local por meio da evapotranspiração, enquanto a retenção de água pluvial contribui para a umidificação do microclima. Em um estudo realizado por Silva e Amaral (2019), observou-se que áreas com jardins de chuva apresentaram temperaturas médias mais baixas em comparação a regiões adjacentes sem intervenções verdes.

Adicionalmente, os jardins de chuva promovem a sustentabilidade econômica e social. Sua implementação requer investimentos relativamente baixos em comparação com infraestruturas tradicionais de drenagem, como canalizações. Além disso, esses sistemas podem ser integrados a projetos paisagísticos, valorizando imóveis e espaços públicos. Em comunidades vulneráveis, os jardins de chuva também representam uma oportunidade para envolver moradores em ações de conservação, fomentando o senso de pertencimento e a colaboração (MARTINS et al., 2019).

Por fim, a adoção de jardins de chuva como parte de políticas públicas para a gestão das águas urbanas é fundamental para construir cidades mais resilientes. Como destaca De Vasconcelos (2023), esses sistemas representam uma abordagem holística que combina benefícios ambientais, econômicos e sociais, sendo uma peça-chave para o enfrentamento das mudanças climáticas e dos desafios hidrológicos urbanos contemporâneos.

3.2.2.1 APLICAÇÃO DE JARDINS DE CHUVA EM ÁREAS URBANAS

A implementação de jardins de chuva nas áreas urbanas oferece soluções eficazes para o gerenciamento de águas pluviais, prevenindo enchentes e

alagamentos, e aliviando os sistemas de drenagem tradicionais. Além disso, esses jardins melhoram a estética urbana e o bem-estar da população, ao integrar elementos paisagísticos e promover ambientes mais saudáveis. Com uma estrutura adaptável que inclui camadas de filtração e drenagem, eles proporcionam um tratamento eficiente das águas, graças à vegetação nativa, que melhora a infiltração e reduz a necessidade de manutenção, como apontam Gomes e Rocha (2020).

A principal vantagem dos jardins de chuva é sua flexibilidade para serem implementados em diversas áreas urbanas. Eles podem ser instalados em calçadas, ruas, praças, parques e até em telhados, adaptando-se aos diferentes espaços disponíveis. Segundo Souza et al. (2020), os jardins de chuva são ideais para aplicação em calçadas, estacionamentos e praças, podendo ser integrados ao planejamento urbano de forma a contribuir para a redução de enchentes e a melhoria da qualidade da água.

Os jardins de chuva têm se destacado como uma solução prática e eficaz no contexto da drenagem urbana sustentável, especialmente em áreas urbanas densamente ocupadas. Esses dispositivos são projetados para capturar, armazenar e infiltrar águas pluviais, reduzindo o escoamento superficial e promovendo a recarga do lençol freático. Em áreas com grande concentração de concreto, como centros urbanos ou bairros industriais, eles ajudam a mitigar os efeitos da impermeabilização do solo e da drenagem ineficaz (Mendes, 2023).

Figura 5- Implantação de Jardins de Chuva em passeios.



Fonte: Cantieri (2022).

A implantação de jardins de chuva exige uma análise criteriosa do local, considerando fatores como o tipo de solo, a capacidade de infiltração, o volume de água esperado e o espaço disponível. Conforme Tucci (2008), solos permeáveis e

áreas com boa exposição à vegetação são mais adequados para esses dispositivos, pois maximizam sua eficiência. Além disso, o uso de espécies vegetais nativas nos jardins contribui para a biodiversidade local e reduz a necessidade de manutenção.

Entretanto, a aplicação de jardins de chuva enfrenta desafios que podem limitar sua expansão, como a falta de conhecimento técnico, recursos financeiros e suporte governamental. De acordo com Fletcher et al. (2013), esses obstáculos podem ser superados por meio de políticas públicas que incentivem a adoção de infraestrutura verde e pela capacitação de equipes técnicas. Além disso, é fundamental aumentar a conscientização pública sobre os benefícios dessa tecnologia para garantir maior aceitação e implementação em áreas urbanas.

Outro aspecto relevante é a necessidade de regulamentações específicas que promovam sua adoção, como a inclusão de incentivos fiscais e a exigência de infraestrutura verde em novos empreendimentos. Outrossim, a criação de programas educacionais voltados a profissionais da construção civil e a realização de projetos-piloto são estratégias eficazes para superar barreiras e demonstrar os benefícios práticos dos jardins de chuva,

Em Portland, nos Estados Unidos, o projeto 'Green Streets', que implementou mais de 200 dispositivos integrados ao sistema de drenagem da cidade, demonstrou grande eficácia, reduzindo significativamente o escoamento superficial e melhorando a qualidade da água que retorna aos corpos d'água. Além disso, os jardins de chuva ajudam a criar espaços verdes acessíveis, a promover a biodiversidade e a melhorar a qualidade de vida dos moradores. Este programa tornou-se um modelo internacional para outras cidades que buscam adotar soluções baseadas na sustentabilidade para enfrentar desafios urbanos relacionados à água e ao clima.

No Brasil, cidades como Curitiba e São Paulo têm explorado projetos semelhantes, adaptados às características climáticas e sociais locais (Marcondes, 2015). Em Curitiba, a integração de jardins de chuva em parques lineares tem sido uma estratégia eficaz para mitigar enchentes em áreas críticas e melhorar a permeabilidade do solo urbano. Em São Paulo, o programa de Microbacias promove a implantação de jardins de chuva em comunidades vulneráveis, buscando reduzir a poluição hídrica e aumentar a resiliência dessas áreas frente a eventos climáticos extremos. Apesar dos desafios, essas cidades demonstram como políticas públicas

adequadas e parcerias com organizações civis podem impulsionar a adoção de soluções sustentáveis.

Figura 6- Jardins de Chuva na cidade de São Paulo



Fonte: Página Cidade de São Paulo (2023).

Desde 2017, conforme mostra a Figura 06, a Prefeitura de São Paulo empreendeu uma série de iniciativas estratégicas para ampliar os espaços verdes da cidade. O programa foi lançado inicialmente com a instalação de 23 jardins de chuva e foi significativamente expandido sob a administração de 2021 para abranger 313 projetos, incluindo jardins, calçadas permeáveis, escadas verdes e valas de bioretenção.

De acordo com o website⁶ oficial da cidade, estes esforços não só ajudam a preservar os recursos naturais e a melhorar a qualidade do ar, mas também a reduzir a necessidade de reparações de emergência nas infra-estruturas e a mitigar desastres naturais. Além disso, os jardins de chuva e outros espaços verdes desempenham um papel crucial na drenagem eficiente da água, aliviando a secura urbana e promovendo a sustentabilidade ambiental em São Paulo.

Por fim, a implementação de jardins de chuva em áreas urbanas requer um planejamento integrado que considere os benefícios ambientais e sociais, bem como estratégias de longo prazo para manutenção e monitoramento. Como destaca Souza et al. (2020), a aplicação efetiva desses dispositivos pode transformar áreas urbanas em espaços mais resilientes e sustentáveis, reduzindo os impactos da urbanização

⁶ Acesso em 05 de janeiro de 2025. Disponível
<<https://capital.sp.gov.br/web/subprefeituras/w/noticias/356074>>

desordenada e das mudanças climáticas.

3.3 VIABILIDADE ECONÔMICA DOS JARDINS DE CHUVA

A análise da viabilidade econômica é um passo essencial para justificar a adoção de jardins de chuva como solução de drenagem urbana sustentável. Embora os custos iniciais de instalação possam ser percebidos como elevados, esses sistemas oferecem benefícios econômicos significativos a médio e longo prazo, equilibrando as despesas com retornos diretos e indiretos. Zhang et al. (2021) enfatizam que os jardins de chuva não apenas reduzem gastos com infraestrutura, mas também promovem ganhos ambientais e sociais, resultando em um custo-benefício altamente atrativo.

Uma das principais vantagens econômicas é a redução de custos associados a enchentes e alagamentos. Jardins de chuva ajudam a mitigar esses eventos, protegendo infraestruturas urbanas contra danos severos. Em áreas com alta impermeabilização, onde os custos de reparação podem ser expressivos, a implementação desses sistemas reduz despesas de reconstrução e manutenção. Além disso, o menor escoamento superficial minimiza o impacto sobre redes de drenagem convencionais, diminuindo sua sobrecarga e prolongando sua vida útil.

Outro aspecto econômico relevante é a redução de custos no tratamento de águas pluviais e esgoto. Ao promover a infiltração da água diretamente no solo, os jardins de chuva filtram naturalmente os poluentes, melhorando a qualidade da água e reduzindo a necessidade de tratamento em estações especializadas. Esse benefício é particularmente vantajoso em grandes centros urbanos, onde o gerenciamento da qualidade da água exige investimentos consideráveis.

Adicionalmente, os jardins de chuva geram valorização de imóveis e áreas urbanas. Incorporados a projetos paisagísticos, eles transformam espaços degradados em áreas verdes atrativas, aumentando o valor imobiliário e promovendo o bem-estar dos moradores. Estudos de caso realizados em cidades como Portland e Seattle, nos Estados Unidos, demonstram que bairros com jardins de chuva bem projetados experimentaram uma valorização média de 10% nos preços das propriedades adjacentes (Zhang et al., 2021).

Além dos benefícios diretos, os jardins de chuva proporcionam vantagens ambientais e sociais, que, embora intangíveis, têm impactos econômicos significativos. Por exemplo, a redução das ilhas de calor urbanas diminui a demanda

por energia elétrica para refrigeração, gerando economia para os moradores. O aumento da biodiversidade e a criação de espaços verdes também contribuem para a saúde mental e física das comunidades, reduzindo custos com saúde pública.

Embora os custos iniciais de instalação variem de acordo com a escala e o projeto, os jardins de chuva demonstram ser uma alternativa mais econômica e sustentável em comparação com sistemas de drenagem convencionais. Eles exigem menos manutenção a longo prazo e são adaptáveis a diferentes contextos urbanos, desde pequenos espaços residenciais até grandes empreendimentos comerciais.

Por fim, a análise da viabilidade econômica deve incluir não apenas os custos financeiros, mas também os benefícios sociais e ambientais que os jardins de chuva trazem para a sociedade. Investir em soluções baseadas na natureza é uma estratégia que alia sustentabilidade e economia, fortalecendo a resiliência urbana e melhorando a qualidade de vida da população.

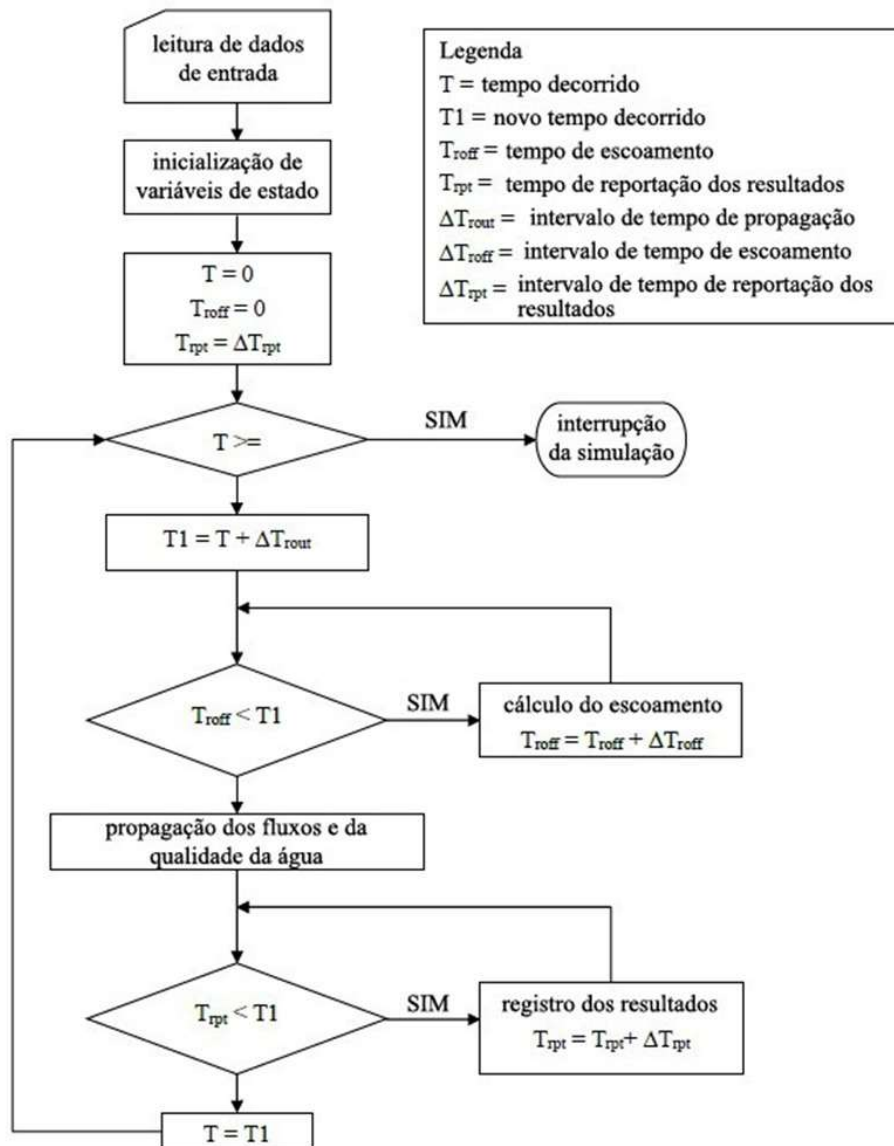
3.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA JARDINS DE CHUVA

3.4.1 Utilização do EPA SWMM na Simulação Hidrológica

O software EPA Storm Water Management Model (SWMM) é uma ferramenta reconhecida mundialmente para a simulação e modelagem de águas pluviais em áreas urbanas. Desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), o SWMM permite analisar o comportamento hidrológico de regiões urbanizadas, fornecendo dados detalhados sobre o escoamento superficial e o desempenho de sistemas de drenagem. Seu uso é fundamental para planejar e projetar soluções sustentáveis, como jardins de chuva, bacias de retenção e pavimentos permeáveis.

Na (Figura 7), é possível explorar a interface do programa, através do fluxograma proposto.

Figura 7- Fluxograma do processo de modelagem com SWMM



Fonte: Andrade (2019)

A principal funcionalidade do SWMM é sua capacidade de modelar processos hidrológicos complexos, incluindo a infiltração, transporte e acúmulo de águas pluviais. Ele considera variáveis como intensidade e duração da precipitação, características do solo, topografia e grau de impermeabilização da área estudada. Como apontam Palla e Gnecco (2020), o software apresenta alta precisão ao prever o comportamento do escoamento superficial, tornando-se indispensável para a avaliação de infraestruturas verdes e práticas de desenvolvimento urbano sustentável.

Entre os destaques do SWMM está sua aplicação na identificação de áreas críticas, como zonas propensas a alagamentos e erosão. Por meio de simulações

detalhadas, gestores urbanos podem mapear vulnerabilidades e propor intervenções direcionadas para minimizar impactos hidrológicos adversos. Isso é especialmente relevante em cidades densamente urbanizadas, onde a impermeabilização do solo e a canalização de cursos d'água frequentemente agravam os problemas de drenagem.

Além disso, o SWMM oferece suporte para o dimensionamento de sistemas de drenagem urbana sustentável, permitindo testar diferentes configurações de infraestrutura e avaliar sua eficácia sob cenários de chuva variados. Por exemplo, ao simular a implementação de jardins de chuva, o software auxilia na determinação de dimensões adequadas, garantindo que esses sistemas sejam capazes de absorver volumes significativos de água durante eventos extremos.

A versatilidade do SWMM também se destaca na análise de impactos de mudanças climáticas sobre o regime hidrológico urbano. Com a possibilidade de inserir cenários futuros de precipitação, o software apoia planejamentos a longo prazo, ajudando as cidades a se tornarem mais resilientes frente a eventos climáticos extremos, como tempestades intensas.

Por fim, o uso do SWMM não se limita a estudos acadêmicos ou grandes projetos. Graças à sua interface acessível e aos recursos de visualização de dados, ele é uma ferramenta útil tanto para especialistas em hidrologia quanto para gestores públicos que desejam tomar decisões baseadas em evidências. A popularidade e a eficiência do SWMM refletem sua importância no campo da drenagem urbana sustentável, sendo uma referência para o desenvolvimento de cidades mais preparadas para os desafios hidrológicos contemporâneos.

4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste estudo baseou-se na abordagem delineada por Martins (2017), que aplicou o modelo computacional SWMM para avaliar o desempenho hidrológico de bacias urbanas. Martins examinou cenários tanto sem intervenções quanto com implementação de medidas LID (Desenvolvimento de Baixo Impacto), como jardins de chuva, demonstrando sua eficácia na gestão sustentável de águas pluviais.

O processo metodológico compreendeu a modelagem computacional da bacia hidrográfica, a escolha de um modelo hidrológico adequado às condições

locais, a caracterização de infraestruturas verdes, como os jardins de chuva, e a criação de cenários distintos para análise comparativa. Essas etapas foram projetadas para avaliar os impactos hidrológicos das soluções sustentáveis na redução do escoamento superficial, da vazão de pico e no aumento do tempo de concentração.

Inicialmente, foram identificadas e analisadas as principais características da sub-bacia PD12, localizada na região central de Teresina, Piauí. Essas informações foram obtidas a partir do projeto original da sub-bacia e do Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDrU, 2010), que forneceu subsídios relacionados à topografia, regime pluviométrico, comportamento do escoamento superficial e ocupação do solo.

A modelagem hidrológica foi conduzida no software EPA SWMM, seguindo as recomendações de Martins (2017). Sendo assim, dois cenários foram simulados: o primeiro retrata as condições atuais, marcadas por uma alta taxa de impermeabilização; o segundo incorpora a implementação de jardins de chuva como dispositivos LID, projetados com base em parâmetros locais, incluindo taxa de infiltração do solo, capacidade de armazenamento e percolação.

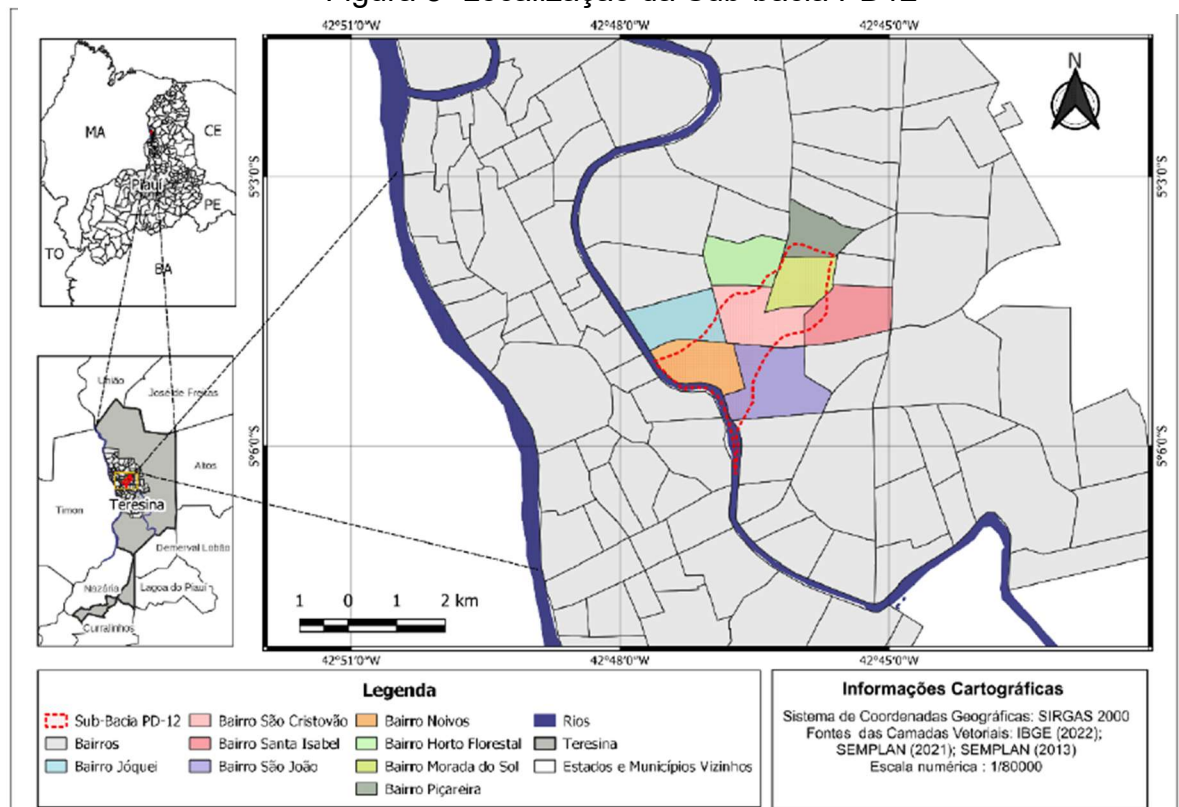
Por fim, os resultados da simulação foram avaliados para determinar a eficiência dos jardins de chuva em termos de redução do volume de escoamento, mitigação da vazão de pico e aumento do tempo de concentração. Posteriormente, foi realizada uma análise econômica preliminar, comparando os custos de instalação e manutenção dos dispositivos com as condições do cenário atual. Esses resultados permitirão avaliar a viabilidade técnica e econômica dos jardins de chuva como uma solução sustentável para o gerenciamento das águas pluviais.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

4.1.2 CARACTERÍSTICAS DA SUB-BACIA PD12 EM TERESINA

A área de estudo selecionada para este trabalho é a sub-bacia PD12, situada em Teresina, Piauí. Localizada na zona leste da cidade, a sub-bacia abrange os bairros Jóquei, São Cristóvão, Santa Isabel, São João, Noivos, Horto Florestal, Morada do Sol e Piçarreira.

Figura 8- Localização da Sub-bacia PD12



Fonte: Tavares (2024).

Para a implementação dos modelos, são indispensáveis informações meteorológicas, hidrológicas, topográficas e a delimitação urbanística da bacia em análise. As características fisiográficas da área de estudo, utilizadas na modelagem, foram extraídas do Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina (PDDUr) (TERESINA, 2012), que disponibiliza, entre outros, dados essenciais para o modelo.

Tabela 1- Características fisiográficas da bacia

Área da bacia	538,13 hectares (5,381 km²)
Tempo de concentração	14,63 min
Área impermeável	69,7%
CN médio	88,46
Largura	7.293 m
Declividade	1,7%

Fonte: Adaptado, Tavares (2024).

A escolha dessa sub-bacia se justifica pela sua relevância na gestão das águas pluviais no perímetro urbano de Teresina, além de ser representativa de áreas com alto grau de urbanização e impermeabilização, características comuns nas grandes cidades. A análise dessa bacia será crucial para entender o impacto de soluções sustentáveis, como os jardins de chuva, na mitigação de riscos hidrológicos e na melhoria da drenagem urbana, tornando-a um cenário estratégico para a implementação de soluções sustentáveis baseadas na natureza.

4.1.1 LOCAIS PARA IMPLANTAÇÃO DOS JARDINS DE CHUVA

Neste estudo, a implantação dos jardins de chuva considerará os 3.989 lotes da sub-bacia PD12. Considera-se que, será instalado um jardim de chuva de 4 m² (2x2m) em cada um destes lotes como parte da estratégia para melhorar a gestão das águas pluviais na região. A decisão de incluir todos os lotes na sub-bacia PD12 visa avaliar o impacto potencial da instalação destes dispositivos em uma área crítica para o controle do escoamento superficial, principalmente devido à prevalência de superfícies impermeáveis e à topografia da região.

A sub-bacia PD12 é uma área densamente urbanizada, caracterizada por uma elevada concentração de lotes, muitos dos quais estão localizados em zonas com superfícies impermeáveis significativas devido ao pavimento e outros desenvolvimentos urbanos. Essa condição dificulta a infiltração das águas pluviais, agravando problemas de enchentes e sobrecarregando o sistema de drenagem da região.

4.2 DADOS DE PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO

Neste estudo, foram utilizados os parâmetros necessários para a simulação do prognóstico da rede de drenagem, incluindo o Curve Number (CN) e o tempo de concentração, conforme definido pelo Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina (PDDrU). Para o cálculo do tempo de concentração, o plano recomenda explicitamente a adoção da equação 1 proposta por Schaake et al. (1967) para o cálculo do tempo de concentração, uma vez que essa metodologia é amplamente reconhecida como referência em estudos hidrológicos urbanos e apresenta maior precisão na estimativa do escoamento superficial em áreas urbanizadas.

$$t_c = \frac{4,968 * L^{0,24}}{S^{0,16} * A_{imp}^{0,26}} \quad (1)$$

Onde: t_c é o tempo de concentração em minutos; L é o comprimento do talvegue em km; S é a declividade (m/m); A_{imp} é a fração de área impermeável.

Além disso, para esta análise, foi considerado o tempo de concentração da Sub-bacia PD12, em Teresina, conforme os dados disponibilizados no Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDrU).

Tabela 2- Valores do parâmetro tempo de concentração por sub-bacia de drenagem para o cenário de prognóstico.

SUB-BACIA	ÁREA (Km ²)	Tc (min)
PD12	5,381	14,63

Fonte: PDDrU (2010)

Para este estudo, os dados de precipitação utilizados foram baseados nas curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF), definidas para a cidade de Teresina, conforme estabelecido no Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDrU, 2010). A equação 2 IDF é apresentada da seguinte forma:

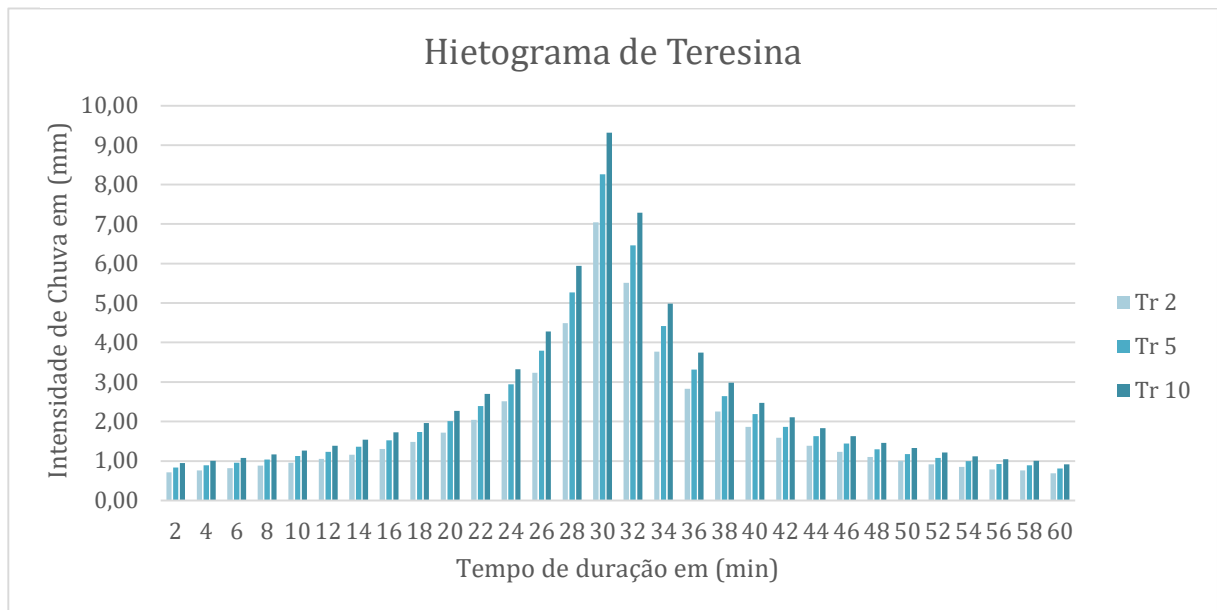
$$I = \frac{1194,273 * Tr^{0,1738}}{(t + 10)^{0,7457}} \quad (2)$$

Onde:

- i : intensidade da chuva (mm/h);
- Tr : período de retorno (anos);
- t : duração da chuva (minutos).

Para o dimensionamento dos jardins de chuva, foram considerados períodos de retorno de 2, 5 e 10 anos, com uma duração ajustada de 60 minutos, em conformidade com as recomendações do PDDrU. A precipitação foi subdividida em intervalos de 2 minutos, possibilitando a criação de hietogramas que refletem a variação temporal da intensidade da chuva ao longo do evento. Para a geração desses hietogramas, foi utilizado o método dos blocos alternados, que permite representar de forma realista a distribuição da precipitação ao longo do tempo, enfatizando os momentos de maior intensidade. Esses hietogramas foram então empregados como entrada no modelo hidrológico para análise do escoamento superficial e avaliação do desempenho dos dispositivos de controle.

Figura 9- Hietogramas obtidos a partir da Curva IDF de Teresina-PI.



Fonte: Autora (2024)

A partir dessa figura, os hietogramas apresentados destacam a distribuição típica de chuvas intensas em Teresina, com picos de intensidade observados entre os 28 e 32 minutos. Essa análise temporal foi crucial para a parametrização do modelo hidrológico, para permitir verificar a eficiência dos jardins de chuva no controle do escoamento superficial, especialmente em diferentes períodos de

retorno.

4.3 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DOS JARDINS DE CHUVA NO EPA SWMM

A simulação hidrológica dos jardins de chuva foi realizada por meio do software EPA SWMM (Storm Water Management Model). A configuração do modelo incluiu parâmetros específicos dos solos e propriedades hidrológicas da sub-bacia PD12, com a missão de avaliar o impacto dos jardins de chuva na redução do escoamento superficial.

4.3.1 PARÂMETROS UTILIZADOS NA MODELAGEM DE JARDINS DE CHUVA

A tabela abaixo resume os principais parâmetros empregados na modelagem de jardins de chuvas com base nos dados utilizados por Martins (2017). Assim, os parâmetros primordiais para a modelagem do desempenho dos jardins de chuvas são os relacionados à infiltração, armazenamento e condução da água da chuva.

Tabela 3- Dados de cada camada utilizada na simulação de jardins de chuva.

Camada	Parâmetro	Unidade	Valor
Superfície	Armazenamento	mm	250,00
	Volume de vegetação	%	0,00
	Rugosidade (n)	-	0,00
	Declividade	%	0,00
Solo	Espessura	mm	1000,00
	Porosidade	%	0,437
	Capacidade de campo	mm	0,105
	Ponto de murcha	%	0,047
	Condutividade	mm/hr	3,00
	Condutividade	%	10,00
	Sucção capilar	mm	2,40
Armazenamento	Índice de vazios	-	0,75
	Taxa de infiltração	mm/hr	12,70
	Fator de colmatção	-	0,00

Fonte: Adaptado, Martins (2017).

4.3.1.1 Capacidade de Infiltração do Solo

A capacidade de infiltração do solo é um parâmetro crucial na modelagem de

jardins de chuva, pois determina a rapidez com que o solo pode absorver a água da chuva. Na área estudada, a taxa de infiltração foi definida em 12,7 mm/h, baseada em parâmetros médios urbanos, sobre as características do solo em áreas onde os jardins de chuva serão implantados. Essa alta capacidade de infiltração assegura a absorção eficiente da água da chuva, reduz o escoamento superficial e contribui para o reabastecimento dos lençóis freáticos. Além disso, a permeabilidade do solo é essencial para maximizar a infiltração, diminuindo a possibilidade de enchentes e melhorando a qualidade da água ao filtrar poluentes.

4.3.1.2 Profundidade de Armazenamento no Jardim de Chuva

A profundidade de armazenamento no jardim pluvial é um parâmetro crítico para garantir que o dispositivo possa reter eficientemente a água da chuva. Nesta modelagem a profundidade foi fixada em 1 metro. Esta espessura foi escolhida para equilibrar a necessidade de volume de retenção com o potencial de infiltração do solo, evitando a sobrecarga do sistema e reduzindo o pico de vazão. A profundidade de 1 metro permite o armazenamento temporário de água durante o processo de infiltração. Este valor foi determinado com base nas características do solo e na necessidade de gerir os volumes de escoamento, particularmente em áreas urbanas densamente construídas onde o espaço disponível é limitado.

4.3.1.3 Taxa de Percolação no Subsolo

A taxa de percolação subterrânea é um parâmetro crítico para avaliar a capacidade do solo de absorver água infiltrada. Embora o modelo SWMM considere a infiltração diretamente na superfície, a taxa de percolação subterrânea influencia diretamente a velocidade com que a água é filtrada para camadas mais profundas. No estudo de Leandro, a taxa de percolação foi ajustada com base na composição do solo e nos materiais utilizados nos jardins de chuva. O solo foi determinado com uma boa capacidade de percolação devido ao uso de Brita nº 3 na camada de armazenamento, o que facilita o movimento da água para camadas mais profundas do solo, permitindo a recarga do aquífero e reduzindo o risco de saturação superficial.

4.3.1.4 Coeficiente n de Manning para Superfície do Jardim

O coeficiente de Manning (n) é um parâmetro utilizado para modelar a resistência ao escoamento superficial, contabilizando a rugosidade superficial. Para jardins de chuva, o coeficiente de Manning foi fixado em 0,00, indicando uma superfície praticamente sem resistência ao escoamento superficial. Este valor é adequado para superfícies altamente permeáveis, como o solo de jardins pluviais, o que permite uma infiltração de água muito eficiente. Um valor de 0,00 representa um cenário ideal onde o escoamento superficial é minimizado, permitindo a máxima infiltração da água da chuva no solo.

Este parâmetro é particularmente significativo na simulação do escoamento superficial em áreas urbanas. A utilização de pavimentos permeáveis e outras técnicas de drenagem sustentáveis visa reduzir o escoamento rápido e prolongar os tempos de trânsito da água. Em sua tese, Leandro Martins (2017) selecionou um valor de n de 0,00 para representar uma superfície com baixa resistência ao escoamento superficial, facilitando a infiltração de água em jardins pluviais e melhorando a eficiência da drenagem urbana. A adoção deste valor visa simular um sistema que maximize a capacidade de infiltração e minimize o escoamento superficial, objetivo essencial para uma gestão eficaz de águas pluviais em ambientes urbanos.

4.3.1.5 Espessura e Propriedades da Camada de Biorretenção

A camada de bioretenção em jardins pluviais desempenha um papel crucial na remoção de poluentes e no controle do escoamento superficial. Sua espessura foi fixada em 1 metro, com taxa de infiltração de 12,7 mm/h, garantindo efetiva retenção de água pluvial. Esta camada consiste em uma mistura de solo e materiais filtrantes projetados para remover contaminantes como sedimentos, nutrientes e metais pesados do escoamento superficial. A espessura de 1 metro foi escolhida para garantir que a água da chuva tenha tempo suficiente para ser filtrada antes de infiltrar no solo ou ser direcionada para a rede de drenagem.

Além disso, esta camada ajuda a estabilizar a água dentro do jardim pluvial, permitindo processos eficientes de evapotranspiração e percolação. Esse parâmetro foi estabelecido por Leandro Martins em sua tese como parte da modelagem de jardins de chuva para manejo de escoamento e remoção de poluentes.

4.4 DIMENSIONAMENTO DOS JARDINS DE CHUVA

O dimensionamento dos jardins de chuva foi realizado com base nas propriedades hidrológicas da sub-bacia PD12, utilizando dados de precipitação obtidos da curva IDF de Teresina. O objetivo principal foi projetar dispositivos capazes de reter, infiltrar e tratar o volume de água gerado por chuvas de projeto, mitigando o escoamento superficial e os impactos de alagamentos. Os cálculos consideraram parâmetros como a precipitação acumulada para períodos de retorno de 2, 5 e 10 anos, e a área de contribuição.

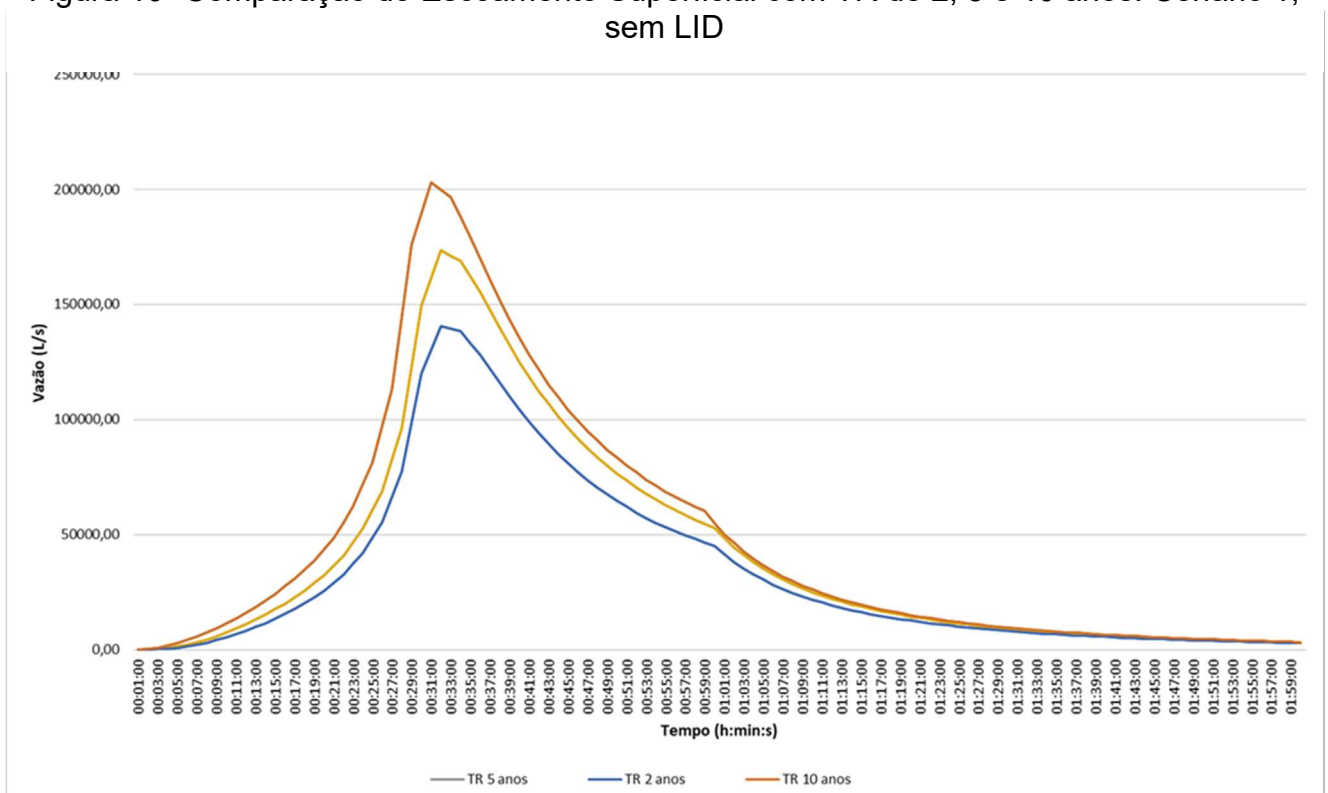
4.5 VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLEMENTAÇÃO

Para compreender a análise de viabilidade econômica dos jardins de chuva na cidade de Teresina, foram utilizados os estudos de Evers et al. (2022) e Almeida (2021). Esses trabalhos investigaram os benefícios e a viabilidade das aplicações de jardins de chuva, ressaltando suas contribuições para a sustentabilidade urbana e o manejo eficiente das águas pluviais. Com base nisso, foi elaborado um orçamento utilizando o programa OrçaFascio, visando apresentar de forma detalhada os benefícios financeiros e os custos associados à implementação desses sistemas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 10 ilustra os resultados da análise do escoamento superficial para diferentes períodos de retorno (TR): 2, 5 e 10 anos, no cenário 1, sem a implementação de medidas de drenagem sustentável (LID). Os resultados revelam que, para um TR de 10 anos, o pico do escoamento superficial ocorreu aos 00:31:00 minutos, atingindo 203.015,3 L/s, o pico mais alto registrado. Para os TRs de 2 e 5 anos, os picos de vazão foram observados aos 00:32:00 minutos, com valores de 140.380,6 L/s e 173.372,3 L/s, respectivamente.

Figura 10- Comparação do Escoamento Superficial com TR de 2, 5 e 10 anos: Cenário 1, sem LID



Fonte: Autora (2024).

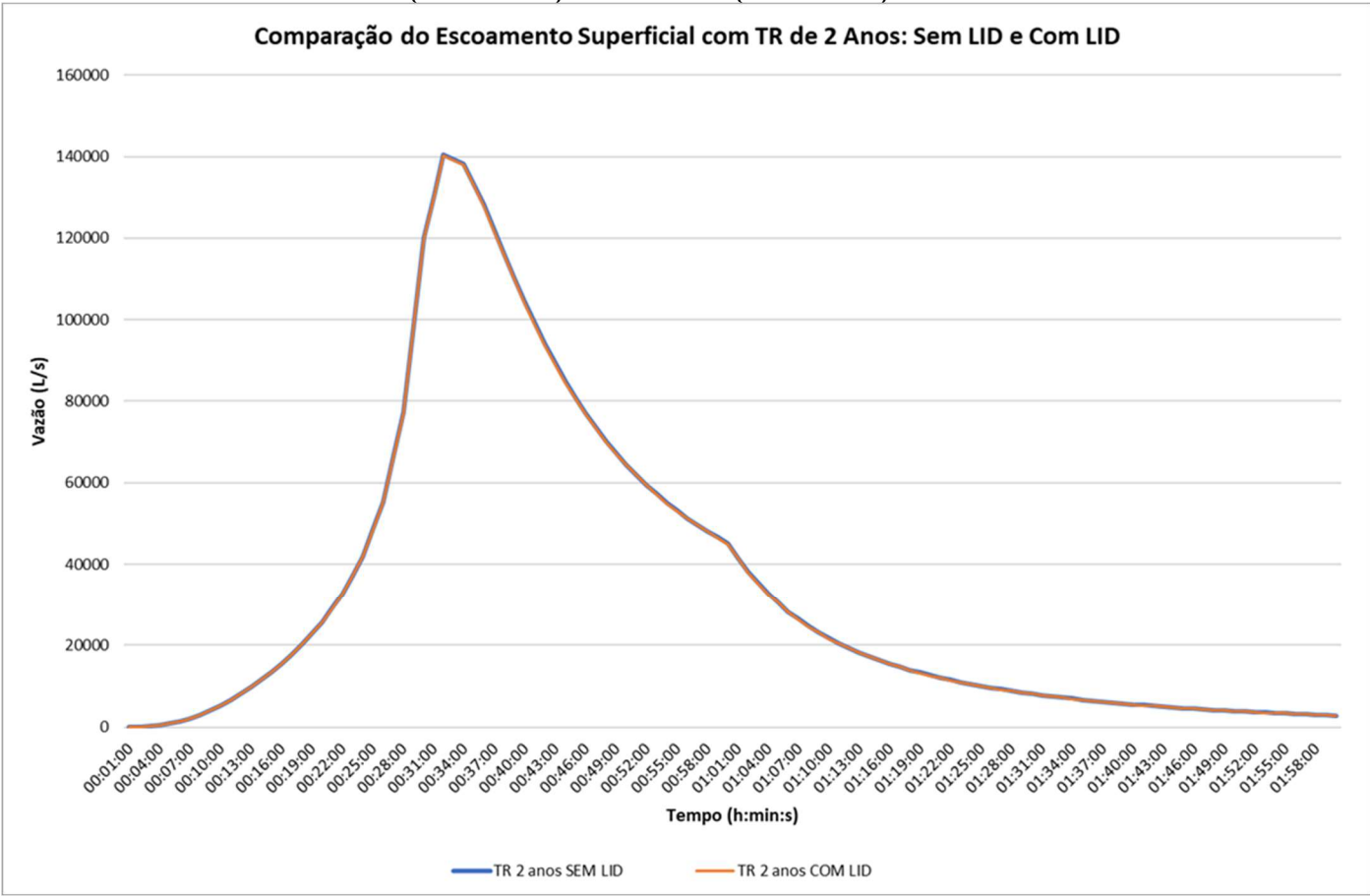
Estes resultados demonstram que à medida que o período de retorno aumenta, o escoamento superficial se intensifica, sendo que o TR de 10 anos apresenta o maior pico de vazão, refletindo a maior intensidade pluviométrica associada a este cenário. A análise desses picos é fundamental para compreender o comportamento hidrológico da área e avaliar o impacto das chuvas em regiões urbanas com elevados níveis de impermeabilidade.

A seguir, será analisado o impacto da implementação de jardins de chuva nas vazões de pico para cada período de retorno (TR), destacando as reduções observadas e a eficácia dessas medidas sustentáveis em comparação com cenários sem LID.

5.1 SIMULAÇÃO COM O TEMPO DE RETORNO (TR) DE 2 ANOS

Como ilustrado na Figura 11, a simulação para o Período de Retorno (TR) de 2 anos demonstrou uma ligeira redução no pico de vazão com a implementação de jardins de chuva. Sem a aplicação do LID (Low Impact Development), o pico de vazão ocorreu no minuto 00:32:00 minutos, atingindo 140.380,6 L/s. Com o LID instalado, esse valor foi reduzido para 140.122,8 L/s, representando uma redução de aproximadamente 0,18%. Embora o impacto tenha sido mínimo, destaca a capacidade do LID de aliviar a pressão sobre o sistema de drenagem, mesmo durante eventos de chuva menos intensos, como aqueles associados a um TR de 2 anos.

Figura 11- Comparação do Escoamento Superficial com TR de 2 anos: Sem LID (Cenário 1) e Com LID (Cenário 2).



Fonte: Autora (2024).

Esta redução, embora pequena, sublinha a importância de práticas

sustentáveis, tais como jardins de chuva em áreas urbanas. A infiltração de água nestes jardins ajuda a manter o escoamento em níveis mais controláveis, reduzindo o risco hidrológicos e danos à infra-estrutura urbana. Portanto, mesmo com uma diminuição moderada de apenas 0,18%, a implementação do LID revela-se significativa na gestão do escoamento de águas pluviais.

Além disso, a Tabela 4 mostra os resultados complementares da pesquisa, obtidos através da simulação.

Tabela 4- Resultados Complementares TR 2 anos

Opções de análise	SEM LID Profundidade (mm)	COM LID Profundidade (mm)	DIFERENÇA Profundidade (mm)
Escoamento superficial	45.475	45.349	0.126
Armazenamento Final	4.122	4.408	-0.286
Saída Externa	Volume (m ³)	Volume (m ³)	Volume (m ³)
	244.457	243.780	6.77 x 10 ⁻⁴

Fonte: Autora (2025).

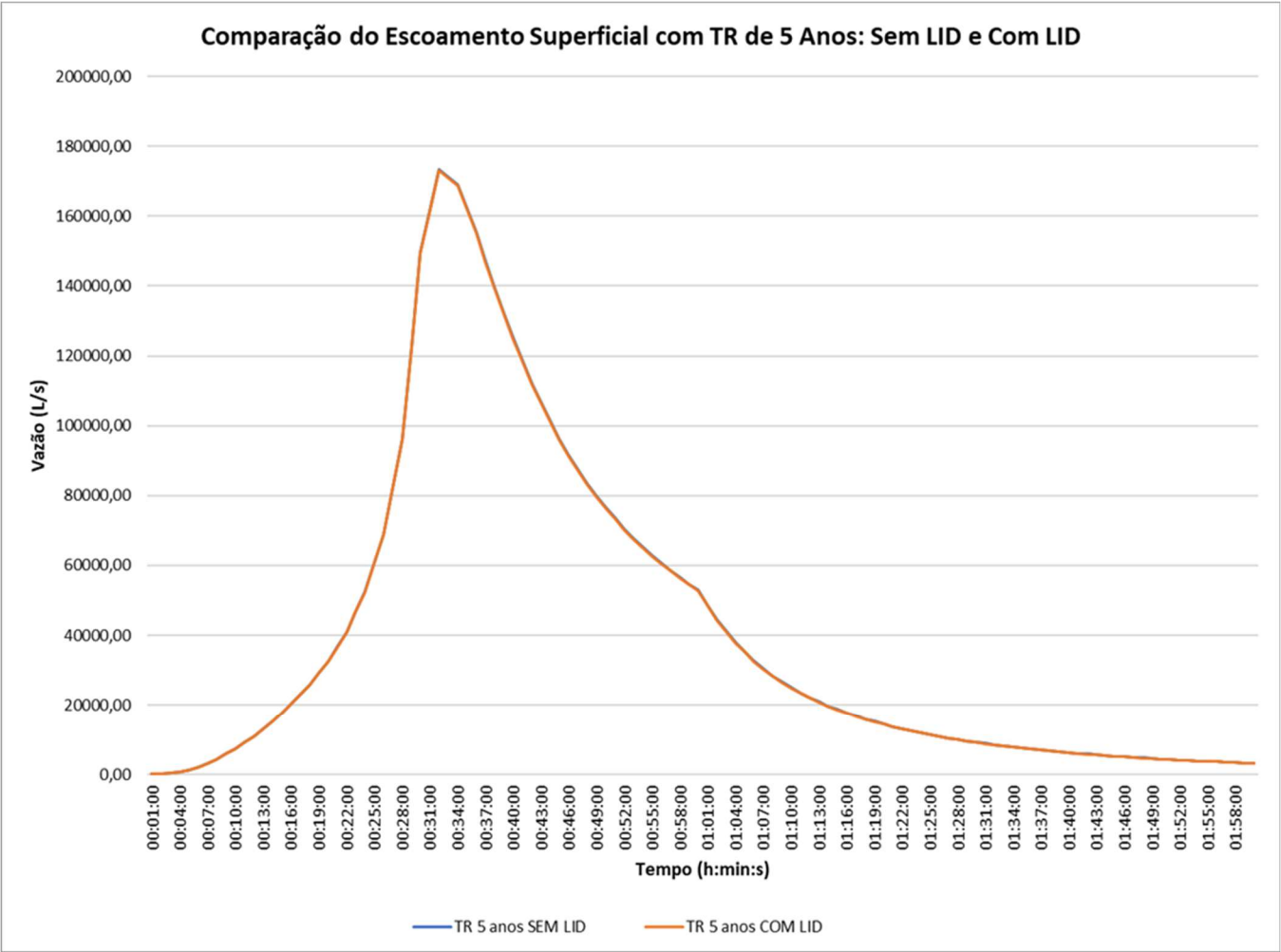
Os resultados apresentados na tabela comparam os dados de drenagem sem e com a implementação de soluções de drenagem sustentável (LID). O escoamento superficial sem LID foi de 45,475 mm, enquanto com LID foi de 45,349 mm, mostrando uma pequena redução de 0,126 mm com o uso das soluções sustentáveis. Em relação ao armazenamento final, o valor sem LID foi de 4,122 m³, aumentando para 4,408 m³ com LID, representando um aumento de 0,286 m³. Para a saída externa, o volume sem LID foi de 244,457 m³ e, com LID, foi de 243,780 m³, resultando numa pequena redução de 6,77 x 10⁻⁴ m³. Esses resultados evidenciam a eficácia das soluções LID na redução do escoamento superficial e no aumento do armazenamento de água, o que pode contribuir para a mitigação de enchentes e a gestão eficiente da água pluvial.

5.2 SIMULAÇÃO COM O TEMPO DE RETORNO (TR) DE 5 ANOS

Em sequência, a Figura 12 mostra no cenário do TR de 5 anos, a simulação também mostrou redução do pico de vazão com a implantação do LID. O pico de fluxo sem LID ocorreu no 00:32:00 minutos, atingindo 173.372,3 L/s, enquanto com LID, o fluxo máximo foi reduzido para 173.043,1 L/s, representando uma diminuição de 0,19%. À medida que o período de retorno aumenta, o impacto do LID na mitigação dos picos de vazão torna-se mais expressivo, contribuindo de forma mais significativa para o controle do escoamento e a preservação dos ambientes urbanos,

especialmente em cenários de chuvas mais intensas.

Figura 12- Comparação do Escoamento Superficial com TR de 5 anos: Sem LID (Cenário 1) e com LID (Cenário 2).



Fonte: Autora (2024).

A implementação de jardins de chuva para o TR de 5 anos, com redução de 0,19% na vazão de pico, representa um avanço na sustentabilidade urbana. A gestão do escoamento durante eventos de chuva mais intensos não só ajuda a reduzir os riscos hidrológicos, mas também minimiza os impactos mais amplos de chuvas intensas.

Além disso, a Tabela 5 mostra os resultados complementares da pesquisa, obtidos através da simulação.

Tabela 5- Resultados Complementares TR 5 anos

Opções de análise	SEM LID Profundidade (mm)	COM LID Profundidade (mm)	DIFERENÇA Profundidade (mm)
Escoamento superficial	54.718	54.565	0.153
Armazenamento Final	4.329	4.643	-0.314
Saída Externa	Volume (m ³)	Volume (m ³)	Volume (m ³)
	294.167	293.348	8.19 x 10 ⁻⁴

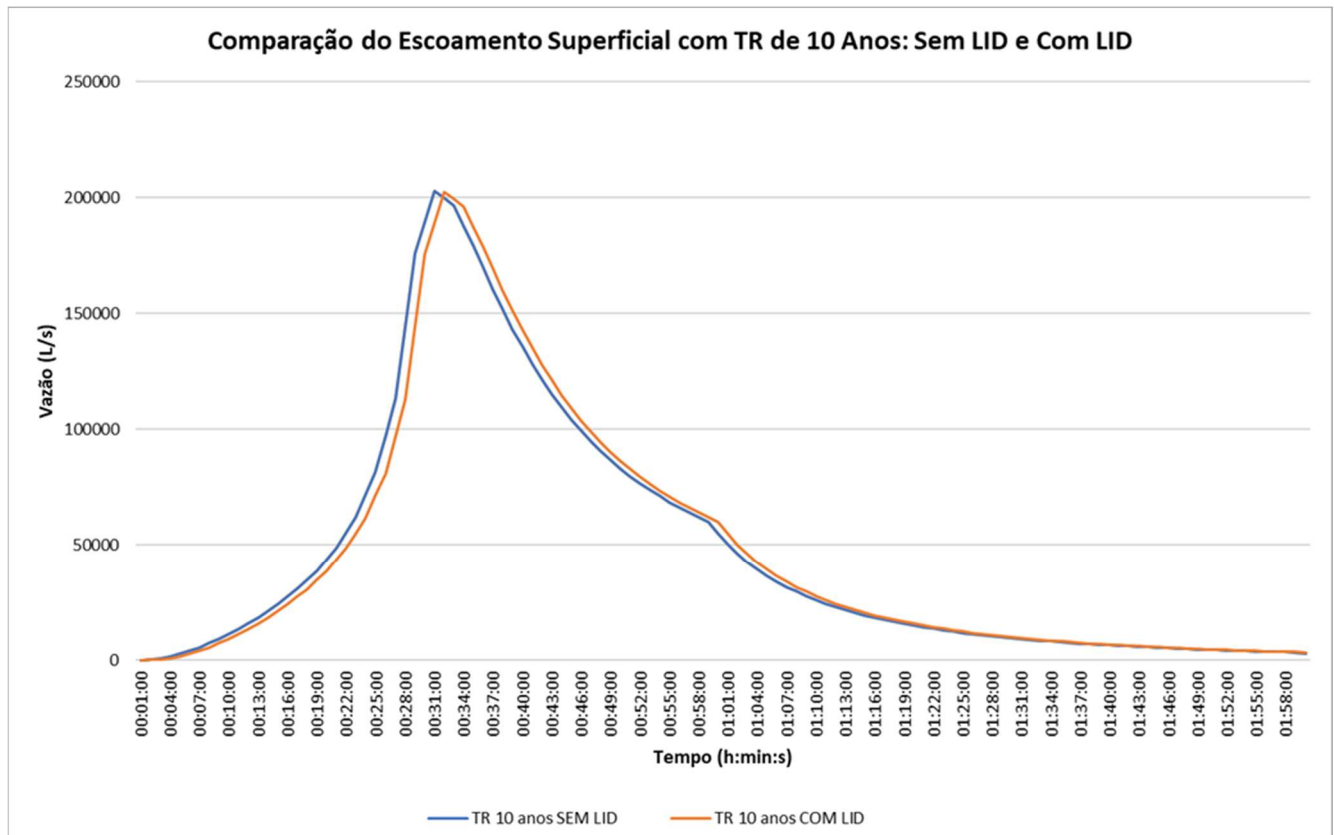
Fonte: Autora (2025).

Os resultados apresentados na tabela comparam os dados de drenagem sem e com a implementação de soluções de drenagem sustentável (LID). O escoamento superficial sem LID foi de 54,718 mm, enquanto com LID foi reduzido para 54,565 mm, resultando em uma diferença de 0,153 mm. Isso mostra que a aplicação das soluções LID teve um pequeno impacto na redução do escoamento superficial. Quanto ao armazenamento final, sem LID o valor foi de 4,329 m³, e com LID foi de 4,643 m³, o que representa um aumento de 0,314 m³. Esse aumento sugere que as soluções LID ajudaram a reter mais água, contribuindo para a redução do escoamento e melhor aproveitamento da água pluvial. Por fim, a saída externa teve um volume de 294,167 m³ sem LID e 293,348 m³ com LID, resultando em uma redução de 8,19 x 10⁻⁴ m³. Embora a diferença seja pequena, ela indica uma leve diminuição no volume de água que escorre para fora da área, reforçando a eficácia das soluções LID na gestão das águas pluviais.

5.3 SIMULAÇÃO COM O TEMPO DE RETORNO (TR) DE 10 ANOS

A Figura 13 mostra o comportamento observado nos resultados do escoamento para o Período de Retorno (TR) de 10 anos, com base nos dados fornecidos, destaca uma dinâmica distinta. Até o 00:31:00 minutos, o escoamento sem a implementação dos jardins pluviais é maior do que o escoamento com LID. No entanto, após esse ponto, o escoamento com LID mostra valores mais altos do que sem LID. Esse padrão pode ser explicado pela interação de sistemas de drenagem sustentáveis, como jardins de chuva, com o escoamento de águas pluviais.

Figura 13- Comparação do Escoamento Superficial com TR de 10 anos: Sem LID (Cenário 1) e com LID (Cenário 2).



Fonte: Autora (2024).

De acordo com Melo et al. (2014), os sistemas de jardins de chuva são projetados para reter uma parte significativa das águas pluviais no início da precipitação, reduzindo temporariamente o escoamento. No entanto, após o pico inicial de precipitação, a água armazenada começa a ser gradualmente liberada pelo sistema, o que explica o aumento do escoamento com LID após o 00:32:00 minutos. Em contraste, o sistema sem as medidas compensatórias permite que a água flua diretamente para o sistema de drenagem, resultando em um escoamento mais rápido e consistente durante todo o evento de chuva.

Essa liberação gradual de água é um dos mecanismos primários dos sistemas LID. Seu objetivo é desacelerar a liberação de água em corpos receptores, evitando picos excessivos de escoamento que podem causar inundações e erosão. No entanto, como os dados mostram, essa retenção inicial pode gerar temporariamente maiores taxas de fluxo após o pico de chuva, pois a água armazenada é liberada lentamente ao longo do tempo. Esse comportamento destaca a eficácia do LID no gerenciamento do escoamento durante o evento de

chuva, apesar do aumento momentâneo após a liberação da água armazenada.

Além disso, a Tabela 6 mostra os resultados complementares da pesquisa, obtidos através da simulação.

Tabela 6- Resultados Complementares TR 10 anos

Opções de análise	SEM LID Profundidade (mm)	COM LID Profundidade (mm)	DIFERENÇA Profundidade (mm)
Escoamento superficial	62.905	62.729	0.176
Armazenamento Final	4.482	4.820	-0.038
Saída Externa	Volume (m ³)	Volume (m ³)	Volume (m ³)
	338.201	337.255	9.46 x 10 ⁻⁴

Fonte: Autora (2025).

Os resultados apresentados na tabela comparam os dados de drenagem sem e com a aplicação de soluções de drenagem sustentável (LID). O escoamento superficial sem LID foi de 62,905 mm, enquanto com LID foi de 62,729 mm, resultando em uma diferença de 0,176 mm. Isso indica uma leve redução no escoamento superficial com o uso das soluções LID, o que contribui para a melhoria na gestão da água pluvial. Quanto ao armazenamento final, sem LID o valor foi de 4,482 m³, enquanto com LID esse valor aumentou para 4,820 m³, representando um acréscimo de 0,038 m³. Esse aumento sugere uma maior capacidade de retenção de água com a implementação das soluções sustentáveis, o que ajuda a reduzir o escoamento e melhorar a infiltração da água no solo. Em relação à saída externa, o volume sem LID foi de 338,201 m³, e com LID foi de 337,255 m³, resultando numa redução de 9,46 x 10⁻⁴ m³. Embora a diferença seja pequena, ela indica uma leve diminuição no volume de água que sai da área, mostrando a eficácia das soluções LID na redução do escoamento e controle da drenagem urbana.

5.4 ANÁLISE GERAL: COMPARATIVOS ENTRE OS TR 2, 5 E 10 ANOS

As simulações realizadas destacaram a eficiência dos jardins de chuva na gestão sustentável de águas pluviais, com resultados positivos em todos os cenários analisados. Esta solução de infraestrutura verde revelou-se eficaz na promoção da recarga das águas subterrâneas e na melhoria do controle do escoamento, especialmente em zonas urbanas onde a impermeabilização impede a infiltração natural.

Posto isso, nos três tempos de retorno analisados (2, 5 e 10 anos), a implementação de jardins de chuva demonstrou uma redução no pico de vazão.

Essa análise mostra claramente que, à medida que o tempo de retorno aumenta, o impacto da solução LID se torna mais expressivo, especialmente em eventos de chuvas mais intensos e prolongados. A introdução de soluções como os jardins de chuva é um passo importante para a sustentabilidade urbana, ajudando a reduzir os riscos de alagamentos, a preservação de recursos hídricos e a construção de cidades mais resilientes frente às mudanças climáticas.

5.5 VIABILIDADE ECONÔMICA DOS JARDINS DE CHUVA

A análise da viabilidade econômica dos jardins de chuva considera os custos envolvidos em sua instalação, operação e manutenção, em comparação com alternativas tradicionais, como os reservatórios de captação de águas pluviais. Os jardins de chuva se destacam como uma solução econômica, devido ao menor investimento inicial e à baixa necessidade de manutenção ao longo do tempo. Fundamentados em práticas de drenagem natural, esses sistemas utilizam materiais simples, como solo, cascalho e vegetação, para facilitar a infiltração da água, dispensando a necessidade de grandes estruturas de armazenamento ou sistemas complexos, como os reservatórios de captação, que exigem mais materiais e uma infraestrutura mais robusta.

Por fim, a Tabela 7 apresenta o orçamento detalhado para a implementação de jardins de chuva, permitindo uma comparação clara dos custos e benefícios econômicos em relação aos reservatórios de captação.

Tabela 7- Orçamento de Jardim de Chuva com dimensões de 4m²

Orçamento Sintético									
Item	Código	Banco	Descrição	Und	Quant.	Valor Unit	Valor Unit com BDI	Total	Peso (%)
1			SERVIÇOS PRELIMINARES		1		346,52	346,52	21,66 %
1.1	2497	ORSE	Escavação manual de vala ou cava em material de 1ª categoria, profundidade até 1,50m	m³	4	52,47	52,47	209,88	13,12 %
1.2	72897	SINAPI	CARGA MANUAL DE ENTULHO EM CAMINHAO BASCULANTE 6 M3	m³	4	27,10	27,10	108,40	6,78 %
1.3	72900	SINAPI	TRANSPORTE DE ENTULHO COM CAMINHAO BASCULANTE 6 M3, RODOVIA PAVIMENTADA, DMT 0,5 A 1,0 KM	m³	4	7,06	7,06	28,24	1,77 %
2			ESTRUTURA		1		285,52	285,52	17,85 %
2.1	94279	SINAPI	ASSENTAMENTO DE GUIA (MEIO-FIO) EM TRECHO RETO, CONFECCIONADA EM CONCRETO PRÉ-FABRICADO, DIMENSÕES 39X6,5X6,5X19 CM (COMPRIMENTO X BASE INFERIOR X BASE SUPERIOR X ALTURA), PARA DELIMITAÇÃO DE JARDINS, PRAÇAS OU PASSEIOS. AF 01/2024	M	8	35,69	35,69	285,52	17,85 %
3			FILTRAGEM		1		678,46	678,46	42,41 %
3.1	10514	ORSE	Base com brita graduada reciclada - Faixa "C" - (exclusive transporte da brita)	m³	1,2	230,44	230,44	276,52	17,29 %
3.2	3212	ORSE	Colchão de areia	m³	0,6	129,43	129,43	77,65	4,85 %
3.3	2394	ORSE	Fornecimento e espalhamento de terra vegetal preparada	m³	0,6	107,34	107,34	64,40	4,03 %
3.4	3083	ORSE	Impermeabilização - Fornecimento e aplicação de manta geotextil RT-10, resistencia a tração=10kN/m (antigo Bidim OP-20 ou similar) em colchões drenantes	m²	4	16,13	16,13	64,52	4,03 %
3.5	75	ORSE	Cascalho (piçarra branca) aplicado	m³	1,6	122,11	122,11	195,37	12,21 %
4			PAISAGISMO		1		289,14	289,14	18,08 %
4.1	C3283	SEINFRA	ESPALHAMENTO DO MATERIAL EXPURGADO (TERRA VEGETAL)	m³	0,28	4,31	4,31	1,20	0,08 %
4.2	9320	ORSE	Plantio de mudas de plantas diversificadas	un	6	47,99	47,99	287,94	18,00 %
Total Geral								1.599,64	

Fonte: Autora (2024).

A proposta desse orçamento foi desenvolvida para implantação de jardins de chuva em lotes residenciais, projetados para uma área de 4 m² (2x2 metros) por residência. Este sistema fornece uma solução sustentável para a gestão de águas pluviais, promovendo a infiltração local, reduzindo o escoamento superficial e reabastecendo as águas subterrâneas. O projeto inclui serviços preliminares, estruturação, filtragem e paisagismo, oferecendo uma abordagem abrangente para garantir a eficiência da LID. O custo estimado por lote é de R\$ 1.599,64, sendo uma alternativa viável para inclusão em empreendimentos residenciais.

Uma das principais vantagens dos jardins de chuva reside no seu apelo estético. Estes sistemas integram-se perfeitamente no paisagismo, criando um espaço visualmente agradável e funcional que valoriza os ambientes residenciais e promove uma ligação mais forte com a natureza. Portanto, ao considerar custos, benefícios ambientais e melhoria visual, os jardins de chuva se destacam como uma escolha mais sustentável e funcional para os lotes residenciais.

6.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio de modelagem hidrológica no SWMM, este estudo analisou o impacto da implementação de jardins de chuva na sub-bacia PD12, localizada na zona leste de Teresina, Piauí, sob várias intensidades de chuva representadas por períodos de retorno (TR) de 2, 5 e 10 anos. Os resultados revelam que os jardins de chuva mitigaram consistentemente o escoamento superficial e reduziram os riscos hidrológicos, particularmente durante cenários de chuvas mais intensas.

Em um cenário onde os jardins de chuva foram totalmente implementados em todos os 3.989 lotes dentro da sub-bacia PD12, observou-se uma redução significativa no escoamento superficial. Para eventos de TR de 2 e 5 anos, as reduções foram de 0,18% e 0,19%, respectivamente, sugerindo que mesmo em condições de chuva menos severas, os jardins de chuva aliviam a pressão sobre os sistemas de drenagem existentes. Esses resultados ressaltam a eficácia dos jardins de chuva como uma estratégia de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) para o gerenciamento de águas pluviais urbanas.

Esses resultados alinham-se com os achados de Martins (2017), que observou reduções semelhantes ao utilizar o SWMM para modelar o impacto de jardins de chuva em áreas urbanas. De forma semelhante, Fletcher et al. (2013) e Palla e Gnecco (2020) destacaram que as práticas de LID, como jardins de chuva, são particularmente eficazes na infiltração de água e na redução de picos de vazão em eventos de chuvas intensas, reforçando as observações deste estudo. Além disso, Melo et al. (2014) apontaram a eficácia dos jardins de chuva na gestão de águas pluviais, mesmo em cenários de precipitação moderada.

Economicamente, os jardins de chuva mostraram-se uma solução viável, com um custo estimado de instalação de R\$ 1.599,64 por lote. Zhang et al. (2021) e Evers et al. (2022) também destacaram a vantagem econômica dos jardins de chuva em comparação a alternativas tradicionais de drenagem, ressaltando o impacto positivo desses sistemas na redução de custos e na promoção da sustentabilidade urbana.

A eficácia dos LIDs, como jardins de chuva, é ainda mais amplificada quando combinada com outras soluções de baixo impacto. A integração de várias medidas de LID, como pavimentos permeáveis, bacias de retenção e telhados verdes,

estabelece um sistema interconectado que otimiza o gerenciamento de águas pluviais de forma abrangente. Essa abordagem não apenas maximiza a infiltração e o armazenamento de águas pluviais, mas também distribui as cargas hidrológicas de forma mais uniforme, reduzindo os riscos de inundação e aliviando a carga sobre os sistemas de drenagem convencionais. Como tal, a integração de vários LIDs é recomendada para um gerenciamento de águas pluviais urbanas mais robusto e resiliente.

Ainda assim, a adoção generalizada de jardins de chuva enfrenta desafios. Os custos iniciais de investimento, embora menores do que as alternativas tradicionais, ainda podem ser uma barreira, especialmente em contextos com financiamento limitado. A falta de conhecimento técnico e incentivos governamentais inadequados impede uma implementação mais ampla dessas soluções sustentáveis. Políticas públicas que apoiem a infraestrutura verde, incluindo incentivos fiscais, subsídios e programas de treinamento profissional, são cruciais para superar esses obstáculos.

Pesquisas futuras devem ter como objetivo otimizar os jardins de chuva explorando a eficácia de várias espécies de plantas e substratos, além de investigar as interações entre jardins de chuva e outras práticas de drenagem sustentáveis para fornecer abordagens mais integradas e eficientes. Avaliar os impactos sociais e ambientais desses sistemas também é vital para garantir que sua implementação ofereça benefícios abrangentes às comunidades urbanas.

Concluindo, este estudo demonstra que a implementação de jardins de chuva na sub-bacia PD12 de Teresina oferece benefícios hidrológicos e econômicos significativos, promovendo a sustentabilidade urbana. A integração de soluções baseadas na natureza, como jardins de chuva, com outras práticas de baixo impacto surge como uma estratégia eficaz para enfrentar os desafios da drenagem urbana, promovendo um desenvolvimento urbano mais harmonioso e sustentável. Pesquisas contínuas e o estabelecimento de políticas públicas de apoio são essenciais para expandir o uso de jardins de chuva e outras práticas de drenagem sustentáveis, melhorando as condições ambientais e a qualidade de vida das pessoas urbanas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. **Estudo de viabilidade econômica de sistemas de manejo de águas pluviais em áreas urbanas.** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2021.

ALMEIDA, Fernando. **Estudo de caso no Instituto Federal do Espírito Santo: viabilidade econômica de jardins de chuva.** 2021. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br>. Acesso em: 05 nov. 2024.

BARNETCHE, Diogo. **Hidrologia das águas superficiais da bacia do Rio Inferninho, Biguaçu – SC.** 2006. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/88244/234250.pdf?sequence=1>. Acesso em: 01 dez. 2024.

CASTELLAR, S. M. V.; PEREIRA, C. M. R. B.; GUIMARÃES, R. B. **For a Powerful Geography in the Brazilian National Curriculum.** In: CASTELLAR, S. M. V. (Ed.). *Geographical Reasoning and Learning: Perspectives on Curriculum and Cartography from South America*. Londres: Springer International Publishing, 2021.

COSTA, J. E.; FERREIRA, P. A.; SANTOS, L. F. **Avaliação de técnicas de baixo impacto para controle de enchentes em áreas urbanas utilizando o SWMM.** *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 20, n. 3, p. 373-382, 2015.

DAVIDOVITSCH, Léo. **Estado da arte das técnicas de desenvolvimento de baixo impacto aplicados no controle da drenagem urbana.** 2020. 101 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Hídrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/2171>. Acesso em: 01 dez. 2024.

DAVIS, A. P.; HUNT, W. F.; TRAVER, R. G.; CLAR, M. **Guidelines for design, installation, and maintenance of stormwater bioretention practices.** *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009.

ECKART, K.; MCLANE, M.; SWEENEY, S.; DORSEY, J. J. **Addressing soil infiltration in urban planning: Strategies for Northeast Brazil.** *Urban Soil Science Journal*, 2017.

EVERS, Henrique; CACCIA, Lara; INCAU, Bruno; TORNELLO, Vitor; CORRÊA, Fernando. **Soluções baseadas na natureza implementadas em cidades brasileiras.** 28 nov. 2022. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br>. Acesso em: 30 nov. 2024.

EVERS, S.; HOFFMAN, M.; MARTIN, K. **Economic benefits of urban green infrastructures: Case studies in tropical regions.** *Sustainable Cities and Society*, 2022.

FLETCHER, T. D.; ANDRIEU, H.; HAMEL, P. **Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: a state of the art.** *Advances in Water Resources*, v. 51, p. 261-279, 2013.

GADELHA, Ivana. **Estratégias de manejo de água da chuva para a sub-bacia PD 08 do Rio Poti, em Teresina.** 2018. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciências da Cidade) – Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2018. Disponível em: https://www.oasisbr.ibict.br/vufind/Record/UFOR_a63c91fb52528f03f9b742def9435fa1. Acesso em: 10 nov. 2024.

GARTLAND, Lisa. **Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas.** 1. ed. Cambridge: MIT Press, 2011.

GARRIDO-PEREIRA, M. (Org.). **Geographical Reasoning and Learning: Perspectives on Curriculum and Cartography from South America.** 1. ed. Londres: Springer International Publishing, 2021.

GOMES, R. A.; ROCHA, P. L. **Eficiência de jardins de chuva na redução de escoamento superficial e controle de poluição em áreas urbanas.** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 25, n. 2, p. 1-15, 2021.

HORNBERGER, G. M.; RAFFENSPERGER, J. P.; WIBERG, P. L.; ESHLEMAN, K.

L. **Elements of Physical Hydrology**. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 1998. Disponível em: <https://go.gale.com/ps/i.do?p=AONE&u=googlescholar&id=GALE|A59176814&v=2.1&it=r&sid=AONE&asid=d0def917>. Acesso em: 30 nov. 2024.

LIAO, K. H.; DENG, S.; TAN, P. Y. **Blue-Green Infrastructure: New Frontier for Sustainable Urban Stormwater Management**. In: TAN, P.; JIM, C. (Eds.). *Greening Cities – Advances in 21st Century Human Settlements*. Singapore: Springer, 2017. p. 203–226. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-4113-6_10. Acesso em: 15 nov. 2024.

LIMA, Walter de Paula. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.ipef.br/hidrologia/hidrologia.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2023.

MARTINS, L. G. B. **Avaliação do potencial de aplicações de técnicas compensatórias em áreas urbanas consolidadas**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

MARTINS, R. G.; SOUZA, M. C.; CARDOSO, F. L. **Análise de custo-benefício de infraestrutura verde para manejo de águas pluviais em bacias urbanas**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, n. 4, p. 711-721, 2020.

MEDEIROS, P. H. A.; OLIVEIRA, J. L.; LIMA, J. R. S.; SILVA, B. B.; ANTONINO, A. C. D. **Hydrological simulation in a tropical watershed with the SWMM model**. *Water Resources Management*, v. 28, n. 5, p. 1141-1153, 2014.

MELO, T. dos A. T. de; COUTINHO, A. P.; CABRAL, J. J. da S. P.; ANTONINO, A. C.; CIRILO, J. A. **Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas**. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 147-165, out./dez. 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/3mKRyFjSkPdBkhdvyVGZZLL/>. Acesso em: 30 nov. 2024.

OLIVEIRA JUNIOR, C. J. F.; GONÇALVES, F. S.; COUTO, F.; MATAJS, L. **Potencial das espécies nativas na produção de plantas ornamentais e paisagismo agroecológico.** *Revista Brasileira de Agroecologia*, [S. l.], v. 8, n. 3, 2013. Disponível em: <https://revistas.aba-agroecologia.org.br/rbagroecologia/article/view/13330>. Acesso em: 01 dez. 2024.

PALLA, A.; GNECCO, I. **Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale.** *Journal of Hydrology*, v. 553, p. 68-79, 2020.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1.** Cincinnati: US Environmental Protection Agency, 2015.

SILVA, F. T.; COSTA, R. P.; ARAÚJO, L. S. **Taxas de infiltração em solos urbanos compactados do Nordeste brasileiro.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2021.

TUCCI, C. E. M. **Urbanização e recursos hídricos.** In: BICUDO, C. E. de M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. *Águas do Brasil: análises estratégicas.* São Paulo: Instituto de Botânica, 2010. Disponível em: <https://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-6820.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2024.

ZHANG, W.; SHEN, Z.; HONG, Q.; CHEN, L.; LI, R. **Assessing the cost-effectiveness of Low Impact Development (LID) practices in controlling stormwater runoff pollution.** *Science of the Total Environment*, v. 790, p. 147958, 2021.

