



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

**IGOR SAMUEL DA SILVA BARBOSA**

**IMPACTO DOS TELHADOS VERDES NA MITIGAÇÃO DO ESCOAMENTO  
SUPERFICIAL EM LOTEAMENTOS RESIDENCIAIS DE TERESINA-PI**

**TERESINA**

**2024**

IGOR SAMUEL DA SILVA BARBOSA

IMPACTO DOS TELHADOS VERDES NA MITIGAÇÃO DO ESCOAMENTO  
SUPERFICIAL EM LOTEAMENTOS RESIDENCIAIS DE TERESINA-PI

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

2024

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

---

Barbosa, Igor Samuel da Silva

B238i      Impacto dos telhados verdes na mitigação do escoamento  
superficial em loteamentos residenciais de Teresina - PI / Igor Samuel  
da Silva Barbosa - 2024.  
59 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, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Mauro César de Brito Sousa

1. Engenharia civil. 2. Telhados verdes. 3. LID. 4. Drenagem urbana  
sustentável.

I. Título.

CDD - 624

---

**Elaborado por Isabel dos Santos Lima CRB 3/1060**

IGOR SAMUEL DA SILVA BARBOSA

IMPACTO DOS TELHADOS VERDES NA MITIGAÇÃO DO ESCOAMENTO  
SUPERFICIAL EM LOTEAMENTOS RESIDENCIAIS DE TERESINA-PI

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: 12 / 09 / 2024.

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 Costa  
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, e acima de tudo, agradeço a Deus por ter me dado a força para sonhar e a coragem para ir além, lutando por aquilo que acredito. Sem o amor, a perseverança e a sabedoria dele, eu não teria chegado até aqui.

Em segundo lugar, agradeço à minha mãe, Francisca Ivone da Silva Nascimento, por sempre me incentivar e me acompanhar nesse caminho. Sem todo o esforço e todos os sacrifícios que ela fez por mim, eu também não teria chegado até aqui. E poder compartilhar e dedicar esse trabalho a ela é o meu maior presente.

Agradeço especialmente à minha tia, Maria José da Silva, responsável não só pelos meus primeiros ensinamentos, mas também pela sabedoria, disciplina e caráter que até hoje aprendo com ela. Aos demais familiares que me apoiaram, mesmo que indiretamente, eu entrego meu muito obrigado. Todos os incentivos me condicionaram de alguma forma para realização dessa conquista.

Agradeço ainda aos meus amigos, dentre os quais preciso citar meu irmão de coração, Davi, pois ele foi o pivô que me ajudou na escolha do tema para o presente estudo. Não posso deixar de citar também meus amigos Marcos Vinícius, André, Girleiane e Luís Paulo, que estão sempre do meu lado, trilhando juntos esse caminho em companhia durante as noites, os finais de semana, em qualquer dificuldade e em todos os momentos de alegria. Aos demais amigos do IFPI, também obrigado.

Dedico agradecimentos ainda para todos os meus amigos da Escola Cidadão Cidadã, por todo o apoio que me dão, mesmo distantes, pois apesar de que cada um de nós pegou suas respectivas estradas, nossa rede de apoio nunca fraquejou. A nossa amizade ultrapassou tanto os muros da escola quanto o decorrer do tempo.

Agradeço também ao meu professor, mestre, mentor, exemplo e referência, meu orientador, Dr. Mauro César de Brito Sousa, por me acolher desde os períodos iniciais do curso, a todo momento determinado a transmitir não somente o conteúdo técnico, mas também a maturidade necessária para a formação de um engenheiro profissional e verdadeiramente qualificado. A ele agradeço por essa e por tantas outras experiências ímpares que vivi no curso de Engenharia Civil do IFPI, sobretudo, pelos conselhos e aprendizados.

Por fim, mas não menos importante, agradeço ao meu amor, Maria Francisca, minha outra metade, àquela que me apoia incondicionalmente, estando presente nas minhas maiores alegrias e dificuldades. Com ela sei que consigo até o impossível.

“Nada é suficiente para quem o suficiente é pouco.”

Epicuro

## RESUMO

Teresina, capital do estado do Piauí, enfrenta mudanças climáticas extremas que agravam suas vulnerabilidades sociais, ambientais e econômicas. A impermeabilização de grande parte do seu sítio urbano, somado a uma infraestrutura deficitária, culminou no agravamento dos desastres durante as cheias e precipitações. Diante disso, novas abordagens voltadas à sustentabilidade têm sido aplicadas como o Desenvolvimento de Baixo Impacto (*Low Impact Development* – LID), e o Desenho Urbano Sensível à água (*Water Sensitive Urban Design* - WSUD). O modelo LID propõe a utilização de técnicas compensatórias como ações mitigadoras aos efeitos nocivos da urbanização no ciclo hidrológico, reduzindo os picos de vazão nas precipitações e o escoamento superficial nas áreas do entorno. Entre essas técnicas, os telhados verdes vêm se destacando, na medida em que suas camadas isolantes contribuem para o desempenho térmico das edificações, fator decisivo em regiões de altas temperaturas, sobretudo em centros urbanos acometidos por ilhas de calor. Nesse sentido, o presente trabalho avaliou a aplicação de telhados verdes em sistemas de drenagem sustentável para loteamentos residenciais de Teresina-PI, por meio de modelagem computacional no Modelo de Gestão de Águas Pluviais (*Storm Water Management Model* – SWMM), dando ênfase em seu desempenho hidrológico e sua viabilidade econômica de implantação através de composições de custos. Após a análise do modelo computacional em cenários de 25% e 100% de conversão da área de telhados, observaram-se reduções dos picos de vazão e do escoamento superficial da microbacia proporcionais ao aumento da área de aplicação, chegando até 35,94% e 31,40% respectivamente, em comparação com o cenário sem aplicação desses dispositivos. Entretanto, foi verificado o aumento de mais de duas vezes o valor necessário para sua construção, com base nas técnicas tradicionais de cobertura em telhas de fibrocimento, propostas originalmente para a área de estudo. Portanto, infere-se que, apesar da contribuição significativa dos telhados verdes para o desempenho hidrológico da região, é imprescindível a adoção de medidas que visem tornar os custos mais acessíveis e incentivar a capacitação do mercado para que seja viável sua utilização, a fim de promover uma cidade sustentável.

**Palavras-chave:** Telhados Verdes; LID; Drenagem Urbana Sustentável.

## ABSTRACT

Teresina, capital of the state of Piauí, faces extreme climate changes that aggravate its social, environmental and economic vulnerabilities. The waterproofing of a large part of its urban site, combined with a deficient infrastructure, resulted in the worsening of disasters during floods and rainfall. In view of this, new approaches focused on sustainability have been applied, such as Low Impact Development (LID) and Water Sensitive Urban Design (WSUD). The LID model proposes the use of compensatory techniques as mitigating actions against the harmful effects of urbanization on the hydrological cycle, reducing peak flow rates in rainfall and surface runoff in surrounding areas. Among these techniques, green roofs have been standing out, as their insulating layers contribute to the thermal performance of buildings, a decisive factor in regions with high temperatures, especially in urban centers affected by heat islands. In this sense, the present work evaluated the application of green roofs in sustainable drainage systems for residential subdivisions in Teresina-PI, through computational modeling in the Storm Water Management Model (SWMM), emphasizing its hydrological performance and its economic viability of implementation through cost compositions. After analyzing the computational model in scenarios of 25% and 100% conversion of the roof area, reductions in peak flow and surface runoff of the microbasin were observed proportional to the increase in the application area, reaching up to 35.94% and 31.40% respectively, compared to the scenario without application of these devices. However, it was found that the cost required for its construction had increased by more than twice, based on traditional fiber cement tile roofing techniques originally proposed for the study area. Therefore, it can be inferred that, despite the significant contribution of green roofs to the hydrological performance of the region, it is essential to adopt measures that aim to make costs more accessible and encourage market training so that their use is viable, in order to promote a sustainable city.

**Keywords:** Green Roofs; LID; Sustainable Urban Drainage.



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Comparação entre as técnicas de drenagem higienista e sustentável.....                                                                                | 18 |
| Figura 2 – Integração da drenagem sustentável com a conservação da natureza....                                                                                  | 19 |
| Figura 3 – Exemplo de dispositivos LID de controle local: a) poço de infiltração; b) microreservatórios; c) telhados verdes.....                                 | 21 |
| Figura 4 – Concepção das camadas de um telhado verde.....                                                                                                        | 21 |
| Figura 5 – Exemplo de telhados verdes em ordem da esquerda para direita: tipo extensivo e tipo intensivo .....                                                   | 22 |
| Figura 6 – Exemplo de dispositivos LID de controle linear: a) trincheira de infiltração; b) vala de retenção; c) jardins de chuva; d) pavimentos permeáveis..... | 23 |
| Figura 7 – Exemplo de dispositivos LID de controle centralizado, em ordem da esquerda para direita: reservatório de retenção e bacias de retenção.....           | 25 |
| Figura 8 – Concepção da introdução de LID na sub-bacia dentro do SWMM.....                                                                                       | 27 |
| Figura 9 – Concepção do escoamento superficial no SWMM.....                                                                                                      | 27 |
| Figura 10 – Comparação entre o hidrograma de referência e os hidrogramas simulados em diferentes cenários de cobertura por telhados verdes.....                  | 29 |
| Figura 11 – Área total do terreno a ser loteado em Teresina-PI.....                                                                                              | 33 |
| Figura 12 – Planta de locação do projeto urbanístico do loteamento.....                                                                                          | 34 |
| Figura 13 – Destaque da área de telhados como área de estudo.....                                                                                                | 36 |
| Figura 14 – Localização do loteamento na sub-bacia PD03.....                                                                                                     | 37 |
| Figura 15 – Hidrogramas gerados pela IDF de Teresina-PI.....                                                                                                     | 38 |
| Figura 16 – Levantamento planialtimétrico do loteamento.....                                                                                                     | 39 |
| Figura 17 – Tabela de valores dos parâmetros CN para os solos tipo A, B, C e D.....                                                                              | 42 |
| Figura 18 – Hidrogramas dos cenários diagnósticos resultantes do SWMM.....                                                                                       | 46 |
| Figura 19 – Hidrogramas resultantes com TR de 2 anos retirados do SWMM.....                                                                                      | 47 |
| Figura 20 – Hidrogramas resultantes com TR de 5 anos retirados do SWMM.....                                                                                      | 48 |
| Figura 21 – Hidrogramas resultantes com TR de 10 anos retirados do SWMM.....                                                                                     | 48 |
| Figura 22 – Comparação dos cenários de intervenção e diagnóstico em 100% de cobertura da área de telhados.....                                                   | 50 |
| Figura 23 – Comparação dos cenários de intervenção e diagnóstico em 25% de cobertura da área de telhados.....                                                    | 50 |
| Figura 24 – Orçamento para 1 m <sup>2</sup> de telhado verde.....                                                                                                | 52 |
| Figura 25 – Orçamento para 1 m <sup>2</sup> de telhamento em fibrocimento.....                                                                                   | 52 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Camadas utilizadas na modelagem de controles LID.....                  | 28 |
| Tabela 2 – Descrição geral das áreas do loteamento.....                           | 35 |
| Tabela 3 – Quadro resumo quanto à permeabilidade das áreas do loteamento.....     | 35 |
| Tabela 4 – Coeficiente n de Manning para escoamentos em superfície livre.....     | 40 |
| Tabela 5 – Profundidade de armazenamento em depressões.....                       | 41 |
| Tabela 6 – Resumo das propriedades de entrada da microbacia do loteamento.....    | 43 |
| Tabela 7 – Áreas de implementação dos telhados verdes nos diferentes cenários.... | 43 |
| Tabela 8 – Parâmetros de controle LID utilizados para telhados verdes no SWMM.... | 44 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|         |                                                  |
|---------|--------------------------------------------------|
| LID     | Low Impact Development                           |
| SUDS    | Sustainable Urban Drainage Systems               |
| WSUD    | Water Sensitive Urban Design                     |
| BMP     | Best Management Practices                        |
| SbN     | Soluções baseadas na Natureza                    |
| SWMM    | Storm Water Management Model                     |
| EPA     | Environmental Protection Agency                  |
| PDDrU   | Plano Diretor de Drenagem Urbana                 |
| TR      | Tempo de Retorno ou Tempo de Recorrência         |
| IDF     | Intensidade-Duração-Frequência                   |
| CN      | Curve-Number                                     |
| SCS     | Soil Conservation Service                        |
| NRCS    | National Resources Conservation Service          |
| SINAPI  | Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices |
| Seinfra | Secretaria de Infraestrutura do Ceará            |
| Orse    | Sistema de Orçamento de Obras de Sergipe         |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                  |                                   |
|------------------|-----------------------------------|
| %                | Porcentagem                       |
| L/s              | Litros por segundo                |
| m <sup>2</sup>   | Metro quadrado                    |
| cm               | centímetro                        |
| min              | minutos                           |
| t <sub>c</sub>   | Tempo de Concentração             |
| i                | Intensidade de precipitação       |
| t                | Tempo de duração                  |
| T                | Tempo de Retorno                  |
| S                | Declividade da bacia              |
| A <sub>imp</sub> | Área impermeável                  |
| L                | Comprimento do talvegue           |
| W                | largura da sub-bacia              |
| n                | coeficiente de rugosidade Manning |
| d                | profundidade da lâmina d'água     |
| d <sub>s</sub>   | capacidade de armazenamento       |

## SUMÁRIO

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>                                  | <b>14</b> |
| <b>2 OBJETIVO.....</b>                                    | <b>16</b> |
| 2.1 OBJETIVO GERAL.....                                   | 16        |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                            | 16        |
| <b>3 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>                         | <b>17</b> |
| 3.1 DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL.....                      | 17        |
| <b>3.1.1 Evolução da Drenagem Urbana Sustentável.....</b> | <b>17</b> |
| <b>3.1.2 Técnicas Compensatórias.....</b>                 | <b>20</b> |
| 3.1.2.1 Técnicas de Controle na Fonte Locais.....         | 20        |
| 3.1.2.2 Técnicas de Controle na Fonte Lineares.....       | 23        |
| 3.1.2.3 Técnicas de Controle Centralizado.....            | 24        |
| 3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA.....                            | 25        |
| 3.3 VIABILIDADE ECONÔMICA DOS TELHADOS VERDES.....        | 30        |
| <b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                         | <b>32</b> |
| 4.1 ÁREA DE ESTUDO.....                                   | 32        |
| 4.2 DADOS DE PRECIPITAÇÃO.....                            | 37        |
| 4.3 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NO EPA SWMM.....                | 39        |
| <b>4.3.1 Determinação da declividade.....</b>             | <b>39</b> |
| <b>4.3.2 Largura de Escoamento Superficial.....</b>       | <b>40</b> |
| <b>4.3.3 Coeficiente n de Manning.....</b>                | <b>40</b> |
| <b>4.3.4 Armazenamento em depressões.....</b>             | <b>41</b> |
| <b>4.3.5 Parâmetro de Infiltração.....</b>                | <b>41</b> |
| 4.4 IMPLEMENTAÇÃO DOS TELHADOS VERDES.....                | 43        |
| 4.5 ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....                           | 45        |
| 4.6 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....                  | 45        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                      | <b>46</b> |
| 5.1 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NO EPA SWMM.....                | 46        |
| 5.2 VIABILIDADE ECONÔMICA DOS TELHADOS VERDES.....        | 52        |
| <b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                        | <b>55</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                   | <b>57</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Lima (2019), Teresina, capital do estado do Piauí, teve um processo de crescimento desordenado a partir de 1950. Dessa forma, a retirada da vegetação natural e a impermeabilização de grande parte do sítio urbano ao longo dos anos, culminou em impactos negativos para a qualidade de vida da população e do meio ambiente, como a instalação de ilhas de calor e o agravamento dos desastres causados durante as cheias e precipitações.

Enquanto a administração local mantém o sistema de drenagem já existente, com ações restritas à adoção de medidas paliativas emergenciais, a cidade enfrenta mudanças climáticas extremas e vulnerabilidades sociais, ambientais e econômicas. Nesse contexto, segundo Pedrosa (2021), diante do avanço da degradação causada pelas águas pluviais, novas abordagens emergiram, cada vez mais consolidadas, voltadas à sustentabilidade.

Dentre tais abordagens cabem citar: o Desenvolvimento de Baixo Impacto (*Low Impact Development* – LID), na América do Norte e Nova Zelândia; o Sistema de Drenagem Urbana Sustentável (*Sustainable Urban Drainage Systems* – SUDS), no Reino Unido; o Desenho Urbano Sensível à água (*Water Sensitive Urban Design* - WSUD), na Austrália; e as Melhores Práticas de Gerenciamento (*Best Management Practices* - BMPs), nos Estados Unidos e Canadá (Martins, 2017).

Sob tal perspectiva, o conceito LID propõe o gerenciamento sustentável das águas urbanas, empregando técnicas compensatórias como ações mitigadoras aos efeitos nocivos da urbanização no ciclo hidrológico. No que diz respeito aos escoamentos superficiais, as soluções podem ser de cunho estrutural e não-estrutural, (Martins, 2017).

De maneira que, as medidas estruturais podem ser de controle na fonte, sendo local ou linear (telhados verdes, microreservatórios, pavimentos permeáveis, jardins de chuva, poços, trincheiras e valas de infiltração); e de controle centralizado (bacias de infiltração, retenção e detenção). As medidas não estruturais, por sua vez, orientam a ocupação territorial e o comportamento da população por meio de leis de uso e ocupação do solo, educação ambiental, seguro-enchente e sistemas de alerta e previsão de inundações (Paithankar e Taji, 2020; Pedrosa, 2021; Canholi, 2005).

Ressalta-se que, dentre as técnicas compensatórias supracitadas, os telhados verdes se destacam, pois o substrato em sua estrutura apresenta vantagens

particulares como o aumento da evapotranspiração, a qual reduz a temperatura da superfície das edificações e melhora o microclima do espaço aberto após as precipitações (Köhler et al., 2001). Além disso, proporcionam uma vista atraente das construções adjacentes, aspecto em geral negligenciado financeiramente, mas que oferece um importante diferencial, podendo ser inseridos tanto nos projetos arquitetônicos como em estruturas existentes por *retrofit* (Paithankar e Taji, 2020).

No entanto, segundo Köhler et al. (2001), apesar da aplicação consolidada dos telhados verdes em climas temperados e da variedade de estudos em climas tropicais úmidos, faz-se necessário análises em regiões tropicais quentes e semiáridas, sobretudo quanto a praticidade e viabilidade de sua utilização. Nesse sentido, de acordo com Tucci (2003), é necessário conhecer as propriedades do ciclo hidrológico local, bem como dimensionar o impacto gerado pela aplicação das técnicas compensatórias.

Logo, o modelo de gerenciamento de águas pluviais (*Storm Water Management Model* – SWMM) da Agência de Proteção Ambiental (*Environmental Protection Agency* – EPA) dos Estados Unidos é muito utilizado para simular a resposta hidrológica da bacia hidrográfica. De acordo com Palla e Gnecco (2015), o SWMM foca no aspecto quantitativo, analisando um conjunto de áreas de sub-bacias que recebem a chuva e geram diferentes componentes hidrológicos, incluindo escoamento superficial, infiltração e evaporação, capaz de simular ainda o desempenho hidrológico de dispositivos de controle LID.

Portanto, através da modelagem computacional no EPA SWMM, o presente trabalho analisou o comportamento hidrológico de telhados verdes aplicados em um loteamento residencial projetado de Teresina-PI, sob as diretrizes do conceito LID. Adicionado a isso, os dispositivos foram avaliados quanto à viabilidade econômica de sua implantação através de composições de custos e materiais. Assim, discutiu-se o uso dessa técnica compensatória não apenas quanto a mitigação dos intensos eventos de precipitação na capital, mas também foram propostas medidas praticáveis necessárias para o uso sustentável do solo e gerenciamento das águas urbanas.

## 2 OBJETIVO

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar o impacto dos telhados verdes na mitigação do escoamento superficial em loteamentos residenciais de Teresina-PI, identificando como essa solução contribui para a melhoria da drenagem urbana e a redução dos riscos associados a inundações.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar hidrologicamente o comportamento da bacia urbana em um loteamento residencial de Teresina-PI sem a presença de telhados verdes, utilizando o software SWMM;
- Modelar o comportamento hidrológico da mesma bacia urbana com a implementação de telhados verdes, considerando diferentes cenários de cobertura e tempo de retorno das precipitações;
- Comparar os hidrogramas resultantes das modelagens com e sem a presença de telhados verdes, analisando o impacto dessa técnica na mitigação do escoamento superficial e na redução dos riscos de inundações;
- Discutir a viabilidade econômica da implementação de telhados verdes, analisando suas vantagens e desvantagens em relação às técnicas tradicionais de drenagem urbana.



### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL**

##### **3.1.1 Evolução da Drenagem Urbana Sustentável**

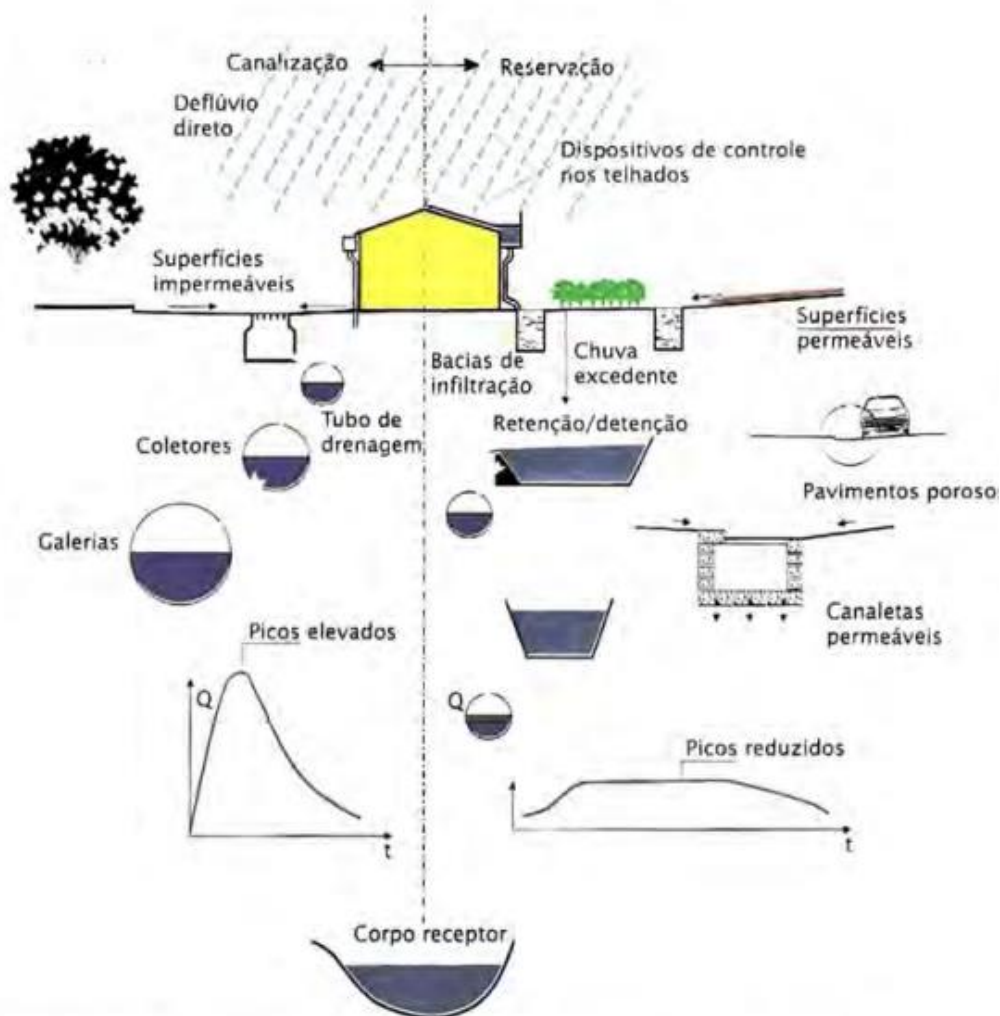
O desmatamento e a substituição da cobertura vegetal natural são intervenções que, em muitas situações, resultam tanto na redução de tempos de concentração quanto no aumento do volume de escoamento superficial, ocasionado o transbordamento dos cursos d'água. Por conta disso, a partir dos anos 1960, alguns países passaram a questionar a drenagem urbana que, por intermédio de obras destinadas a retirar rapidamente o acúmulo de águas em áreas importantes, transferia o problema para localidades menos prioritárias na jusante (Pompêo, 2000).

De acordo com Canholi (2005), as várzeas dos rios foram incorporadas ao sistema viário por meio das denominadas "vias de fundo de vale". Dessa forma, houve a retificação, canalizada a céu aberto ou confinada em galerias, de inúmeros córregos a fim de permitir a construção dessas vias marginais sobre os antigos meandros.

Em consequência disso, as margens dos corpos hídricos tornaram-se lotes, sobretudo comerciais, dificultando qualquer intervenção ou ampliação dos sistemas de drenagem. Haja vista que, devido ao alto custo ambiental, social e econômico envolvido nas obras de engenharia civil como escavações, movimentação de solos, dragagens, galerias moldadas, tubulações, canalizações, caixas de captação, poços de visitas, sarjetas, diques e equipamentos, tornaram impraticável a implementação de políticas públicas na drenagem urbana tradicional (Canholi, 2005).

Em contrapartida, com as crescentes discussões acerca do desenvolvimento sustentável, estudos como o de Tucci (1993) propuseram a atuação em conjunto das medidas estruturais (voltadas às obras de intervenção), e não estruturais (referente ao planejamento e zoneamento), visando obter-se uma maior retenção, infiltração e percolação das águas pluviais. Desse modo, a compensação das consequências negativas da drenagem tradicional higienista passou a ser conhecida como Drenagem Urbana Sustentável (Tucci, 2005; Canholi, 2005). A Figura 1 apresenta um comparativo dessas duas vertentes.

Figura 1 – Comparação entre as técnicas de drenagem higienista e sustentável.



Fonte: Braga (1994) apud Canholi (2005).

Logo, baseando-se nos conceitos de redução dos impactos ambientais, a partir dos anos 1970, surgiram novas correntes de estudos como o Desenvolvimento de Baixo Impacto (*Low Impact Development* – LID), na América do Norte e Nova Zelândia; o Sistema de Drenagem Urbana Sustentável (*Sustainable Urban Drainage Systems* – SUDS), no Reino Unido; o Desenho Urbano Sensível à água (*Water Sensitive Urban Design* - WSUD), na Austrália; e as Melhores Práticas de Gerenciamento (*Best Management Practices* - BMPs), nos Estados Unidos e Canadá (Martins, 2017; Paithankar e Taji, 2020).

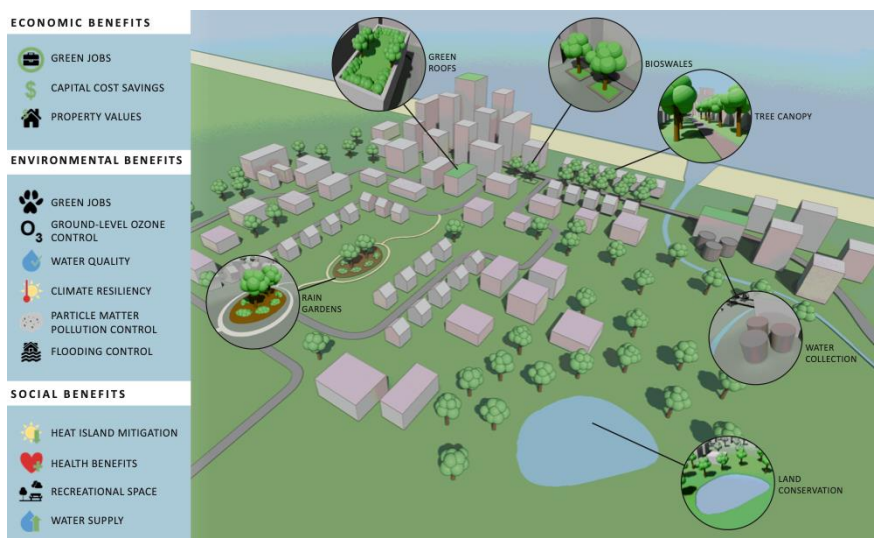
Ainda de acordo com Canholi (2005), os conceitos LID e SUDS apresentam diferenças nas técnicas empregadas, embora busquem atingir objetivos semelhantes. Os projetos de SUDS baseiam-se principalmente na disseminação de dispositivos em diferentes escalas, sobretudo locais, atuando na correção e prevenção dos problemas

de drenagem. Enquanto que, as técnicas de LID utilizam-se das ferramentas de planejamento prévio da urbanização e design inteligente, dando ênfase ao controle na fonte aplicado ao planejamento de novos sistemas e integrando o desenvolvimento dos projetos arquitetônico, paisagístico, viário, entre outros.

Entretanto, a utilização dessas técnicas é normalmente proposta para o uso em propriedades particulares, dificultando a adoção devido aos custos elevados de implantação inicial e a incipiência por parte da população quanto a manutenção dos dispositivos. Um estudo de caso emblemático é da cidade de Portland, EUA, onde o risco de inundações devido à sobrecarga das tubulações foi reduzido significativamente com investimentos em tratamento de águas pluviais. Para tanto, foi introduzido um incentivo fiscal no redirecionamento das águas dos telhados para jardins e gramados (Canholi, 2005).

Nesse contexto, um novo paradigma tem sido proposto para o manejo de águas pluviais adicionado a drenagem urbana sustentável. Christofidis, Assumpção e Kligerman (2019) afirmam que, a partir de 2018, tem-se aplicado uma nova interação sinérgica entre as cidades e a água, na qual a gestão e o manejo passam a ser centrados no desenvolvimento de Soluções baseadas na Natureza (SbN). Em síntese, trata-se da combinação do conhecimento e de práticas da engenharia com as teses de desenvolvimento sustentável, alinhando as preocupações com as mudanças climáticas e a atenção aos ecossistemas hídricos. Essa integração é ilustrada na Figura 2.

Figura 2 – Integração da drenagem sustentável com a conservação da natureza.



Fonte: (njseagrant.org).

### 3.1.2 Técnicas Compensatórias

Segundo Pedrosa (2021), ao longo do tempo, tem-se notado a importância da aplicação das técnicas compensatórias como forma de mitigar os efeitos da alteração na drenagem dos espaços urbanizados, reduzindo o acúmulo de volumes que excedem a capacidade do sistema público de drenagem já implantado. Assim, algumas cidades vêm adotando limites de vazão para lotes a serem implantados, oferecendo possibilidades de implantação de dispositivos de controle LID.

Esse é o caso de Teresina, com a Lei Complementar nº 6.105/2024 a qual atualizou os parâmetros da Lei Complementar nº 4.724/2015 que define as diretrizes para o controle dos impactos da drenagem urbana de novos empreendimentos e inundações ribeirinhas, na drenagem pluvial pública da cidade (Teresina, 2024).

Atualmente, existem vários tipos de técnicas compensatórias para controle de escoamento usados para os mais diferentes casos. De modo que, elas se baseiam em dois princípios básicos: a infiltração a água no solo e a retenção temporal ou permanente da água favorecendo a evaporação (Martins, 2017).

Pedrosa (2021) afirma ainda que, em relação à posição de sua implantação, os dispositivos LID podem ser classificados em técnicas de controle na fonte, que podem ser locais ou lineares; e técnicas de controle centralizado.

#### 3.1.2.1 Técnicas de Controle na Fonte Locais

As técnicas de controle na fonte dispostas no local são aquelas cuja drenagem é proveniente de um lote urbano, condomínio, estacionamento, praça, parque ou passeios públicos. Elas utilizam dispositivos localizados próximos a origem do escoamento com pequenas dimensões e capacidade limitada de reservação, simplificando a alocação dos custos. Os mais utilizados entre esses são os microreservatórios, poços de infiltração e telhados verdes, como mostra a Figura 3 (Pedrosa, 2021).

Os microreservatórios são cisternas instaladas nas residências que armazenam, temporária ou permanentemente, as águas precipitadas nos telhados. Além do retardo do escoamento superficial direto, ocupando pequenas áreas, a água armazenada pode ser reutilizada na irrigação, contra incêndios, na refrigeração e em

processos industriais (Palla, Gnecco e La Barbera, 2017). No Brasil, são bastante utilizados no convívio com a seca do semiárido, na medida em que retêm a água da chuva para fins de abastecimento doméstico (Pedrosa, 2021).

O poço de infiltração, por sua vez, é composto por uma escavação circular onde será introduzido tubos de concreto perfurados lateralmente, envolvidos por uma manta geotêxtil e preenchidos com material granular, permitindo assim o preenchimento dos vazios com a água proveniente do escoamento superficial e posterior infiltração no solo (Martins, 2017).

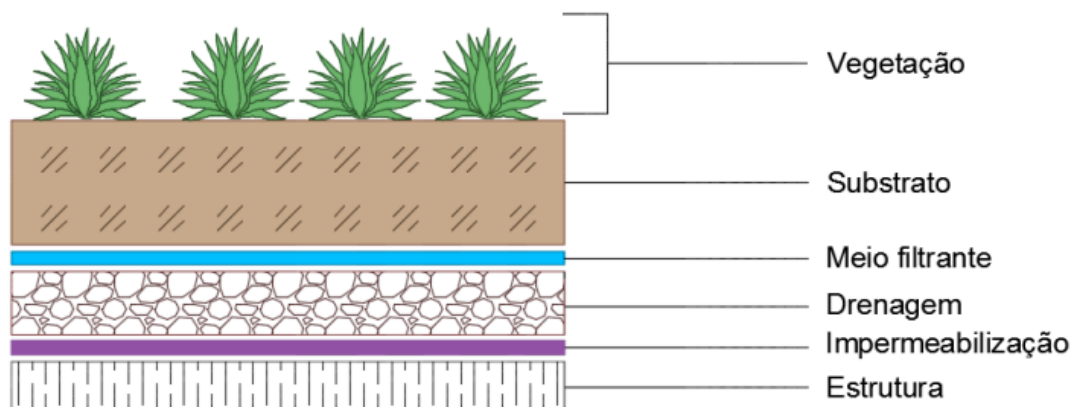
Já os telhados verdes são dispositivos instalados sobre os telhados planos ou inclinados das edificações, funcionando como um microreservatório de águas pluviais, compostos por uma camada impermeabilizante, sistema de drenagem, solo natural ou substrato e vegetação, como observado na Figura 4.

Figura 3 – Exemplo de dispositivos LID de controle local: a) poço de infiltração; b) microreservatórios; c) telhados verdes.



Fonte: (Santos, Barbassa e Gonsalves, 2016; [https://gerenciadeobras.com.br/uso-da-agua-da-chuva/#google\\_vignette](https://gerenciadeobras.com.br/uso-da-agua-da-chuva/#google_vignette); <https://www.ambientelegal.com.br/telhados-verdes-sao-uma-aposta-bonita-e-sustentavel/>, acesso em 24 de set. 2024).

Figura 4 – Concepção das camadas de um telhado verde.



Fonte: Mattos (2015).



De acordo com Martins (2017), referente a espessura da camada de substrato e do tipo de cobertura vegetal, os telhados verdes são classificados em extensivos e intensivos. O tipo extensivo varia entre 4 e 20 cm de solo ou substrato, necessitando de baixa manutenção em função da escolha de cobertura vegetal, a qual deve apresentar boa resistência a escassez de chuva e pouco crescimento vegetativo. Um exemplo de aplicação pode ser visto na Figura 5, que mostra um auditório na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

Por outro lado, os telhados verdes intensivos permitem o trânsito de pessoas, na configuração de terraços vegetados ou jardins. A execução desse tipo de cobertura deve ser acompanhada dando ênfase no cálculo estrutural e no processo de impermeabilização. A camada de substrato tem espessura a partir dos 20 cm podendo receber espécies de vegetação de porte arbóreo, e por conta disso a manutenção compreende um trabalho periódico de adubação, irrigação e podas (Pedrosa, 2021). Um modelo de aplicação pode ser visto também na Figura 5, mostrando a aplicação de árvores de grande porte em uma edificação na cidade de São Paulo, São Paulo.

Figura 5 – Exemplo de telhados verdes em ordem da esquerda para direita: tipo extensivo e tipo intensivo.



Fonte: (<https://ecotelhado.com/>; <https://telhadoscriativos.blogspot.com/2014/06/telhado-verde-sempre-compensa.html>, acesso em 24 de set. 2024).

Em resumo, dentre as vantagens em relação às demais medidas locais de controle na fonte, os telhados verdes trazem benefícios como o aumento das áreas verdes nas cidades, regulação da temperatura, maior vida útil em comparação a telhados convencionais, proteção contra incêndio, retenção das águas pluviais, efeitos estéticos e sociais, melhoria na eficiência energética, contribuição à biodiversidade e

atenuação das ilhas de calor (Paithankar e Taji, 2020).

Ademais, de acordo com Pedrosa (2021), outro valor agregado aos telhados verdes é a possibilidade de geração de renda, visto que eles permitem a produção de hortaliças e o cultivo de plantas ornamentais ou medicinais.

Devido aos vários motivos elencados sobre os benefícios da utilização dos telhados verdes e o interesse de combater a degradação ambiental, várias cidades têm adotado mecanismos de incentivo a fim de promover a adoção de telhados verdes, contribuindo, assim, para a resiliência urbana. Tais mecanismos podem ser diretos, pela concessão de um valor financeiro por instalação; e indiretos, sob a forma de benefícios fiscais (Liberalesso, Silva e Cruz, 2024).

### 3.1.2.2 Técnicas de Controle na Fonte Lineares

Quanto as técnicas lineares, essas podem ser implantadas ao longo dos logradouros públicos e estacionamentos, dispostas em pequenas ou grandes áreas de drenagem, acompanhando suas declividades superficialmente ou em pequenas profundidades. Entre essas medidas estão, como mostra a Figura 6, as trincheiras de infiltração, valas de retenção, jardins de chuva e pavimentos e permeáveis (Martins, 2017).

Figura 6 – Exemplo de dispositivos LID de controle linear: a) trincheira de infiltração; b) vala de retenção; c) jardins de chuva; d) pavimentos permeáveis.



Fonte: <https://www.cityofmlt.com/1869/Stormwater-and-Low-Impact-Development-LI> (acesso em 24 de set. 2024); Portland (2009); <https://sustainabletechnologies.ca/home/urban-runoff-green-infrastructure/low-impact-development/>; [https://nacto.org/docs/usdg/lid\\_handbook\\_clean\\_water\\_services.pdf](https://nacto.org/docs/usdg/lid_handbook_clean_water_services.pdf) (acesso em 24 de set. 2024).

As trincheiras de infiltração são estruturas que permitem a infiltração das águas pluviais após seu armazenamento temporário, e podem ser associadas a outros tipos de dispositivos. Segundo Tucci (1997), o método executivo compreende a escavação linear, preenchida com material drenante podendo ser brita ou seixo, revestido com uma manta geotêxtil, através da qual passa uma tubulação corrugada ou perfurada. Cabe ressaltar que em caso de carreamento de material fino pelo escoamento, sua capacidade de infiltração pode ser reduzida, necessitando de limpeza regular.

Nas valas de detenção, as águas pluviais são conduzidas e detidas temporariamente, para posterior percolação no solo. Podem ser instaladas em paralelo com a rede viária ou estacionamentos, e atuam concentrando o fluxo de água das áreas adjacentes a fim de minimizar os picos de vazões escoadas mediante a infiltração ou retenção ao longo do seu comprimento (Pedrosa, 2021).

Os jardins de chuva ou células de biorretenção consistem em paisagens dispostas linearmente, projetadas para receber águas de chuva e compostas por arbustos, plantas perenes ou árvores. Eles são inseridos em pequenas depressões no solo, preferencialmente permeável a fim de permitir a infiltração natural. Martins (2017), afirma que dentre os benefícios dos jardins de chuva, estão o tratamento de poluentes através da biorretenção, o aumento da recarga das águas subterrâneas e a diminuição do escoamento superficial, apesar da necessidade de manutenção frequente.

Os pavimentos permeáveis são constituídos da mesma maneira que os pavimentos tradicionais, retirando-se o material fino da mistura em concreto ou asfalto. Também existem os pavimentos formados por blocos de concretos vazados em módulos, facilitando a infiltração da água (Tucci, 1997). Em geral, são utilizados em ruas de pouco tráfego ou estacionamentos, passeios e quadras esportivas, visto que sob grande tráfego pode ser deformado ou obstruído.

### 3.1.2.3 Técnicas de Controle Centralizado



Pedrosa (2021) ressalta que as técnicas de controle centralizado compreendem as bacias de infiltração e as bacias de detenção e retenção, caracterizadas por ocupar extensas áreas de drenagem. As bacias de infiltração ou percolação armazenam o escoamento superficial e favorecem a infiltração da água, podendo conter um dreno instalado na mesma. Exemplos de aplicação podem ser vistos na Figura 7.

Figura 7 – Exemplo de dispositivos LID de controle centralizado, em ordem da esquerda para direita: reservatório de detenção e bacias de retenção.



Fonte: <https://thorusengenharia.com.br/bacia-de-contencao-de-cheias-em-edificios-o-que-e-cuidados-e-como-calcular/> (acesso em 30 de set. 2024);  
<https://www.oitomeia.com.br/entretenimento/2018/01/02/parque-lagoas-do-norte-disponibiliza-300-vagas-para-colonia-de-ferias-de-teresina/> (acesso em 30 de set. 2024).

As bacias de detenção são reservatórios utilizados para retardar o escoamento superficial durante uma precipitação e, logo após, liberá-lo gradualmente. Dessa forma, os efeitos da redução da capacidade de armazenamento natural da bacia hidrográfica são mitigados e por serem mantidos esvaziados na maior parte do tempo, esses dispositivos podem servir como espaço para a recreação e a realização de atividades pela população local (Tucci, 1993).

Nas bacias de retenção, o objetivo é o controle de inundações e da qualidade da água, com a sedimentação dos sólidos em suspensão e o tratamento biológico do efluente. Geralmente, são implantados a jusante de uma grande sub-bacia ou em pequenas bacias interligadas, mantidas com lâmina d'água. (Pedrosa, 2021).

### 3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

De acordo com Versini et al. (2015), para a avaliação das técnicas de drenagem urbana sustentável, os estudos normalmente analisam protótipos de dispositivos LID

em escala experimental, definindo dados contínuos de escoamento e precipitação em curtos períodos de tempo. A partir disso, extrapolam o impacto na escala de captação urbana. Parte dos autores, no entanto, simulam a resposta hidrológica das técnicas compensatórias por meio de modelos adaptados nas bacias hidrográficas.

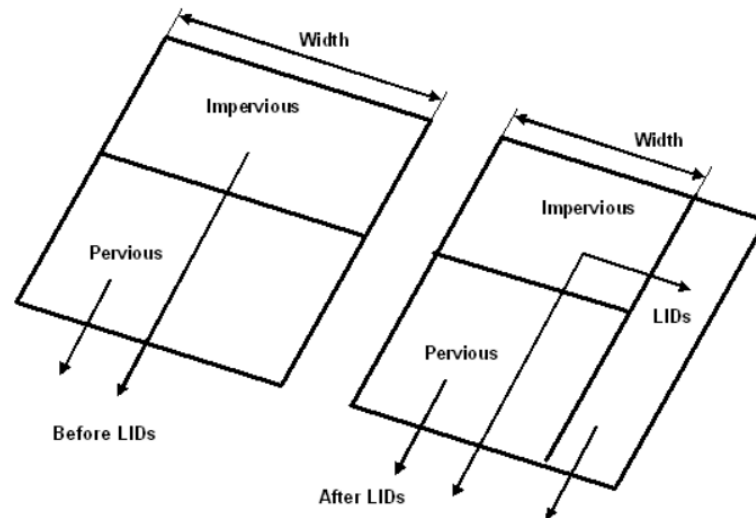
Os estudos de Palla e Gnecco (2015), apontam que vários parâmetros podem ter impacto na resposta hidrológica como o acúmulo e a intensidade da chuva, as condições climáticas, a sazonalidade e as condições antecedentes. Dessa forma, diversas ferramentas são utilizadas para modelagens computacionais de bacias em escalas variadas. Dentre essas, destaca-se o Modelo de Gerenciamento de Águas Pluviais (*Storm Water Management Model – SWMM*), desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental (*Environmental Protection Agency – EPA*) dos Estados Unidos por se tratar de um sistema dinâmico chuva-vazão utilizado especialmente para áreas urbanas.

Isso porque, sua versão 5.1 implementou os módulos de controle LID para simular o desempenho hidrológico de soluções na origem, como jardins de chuva, telhados verdes, trincheiras de infiltração e pavimentos permeáveis. Esses dispositivos são representados por uma combinação de camadas cujas propriedades como espessura, índice de vazios, condutividade hidráulica e características de drenagem subterrânea, são definidas por unidade de área (Palla e Gnecco, 2015).

Martins (2017) afirma também que o modelo integra uma variedade de processos físicos que influenciam nos resultados como a infiltração, o escoamento superficial, a contribuição das águas subterrâneas, o derretimento do gelo, a propagação da vazão, o acúmulo superficial e a qualidade da água.

De acordo com Rossman (2015), para a cobertura do solo da bacia, a representação do escoamento divide o modelo nas parcelas de área impermeável, sem capacidade de retenção; e área permeável com capacidade de retenção. Em caso de emprego de controles LID, os dispositivos são analisados como uma terceira parcela, podendo ser interpretada por áreas permeáveis ou impermeáveis com capacidade de retenção a depender da técnica implantada, como mostra a Figura 8.

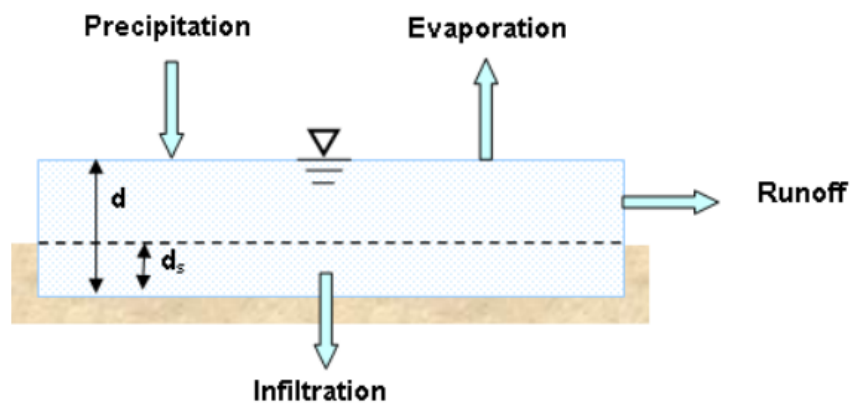
Figura 8 – Concepção da introdução de LID na sub-bacia dentro do SWMM.



Fonte: Rossman (2015).

No que se refere ao escoamento superficial, ainda segundo Rossman (2015), o SWMM considera cada sub-bacia como um reservatório não-linear, sendo a vazão afluente proveniente tanto de precipitações quanto de sub-bacias a montante. A Figura 9 representa a concepção do modelo em que  $d_s$  é a capacidade de armazenamento em depressões e  $d$  é a profundidade da lâmina d'água que varia com tempo. Portanto, o escoamento superficial  $Q$  na equação de Manning, exposta na Equação 1, é resultante da subtração das parcelas de infiltração e evaporação da vazão efluente.

Figura 9 – Concepção do escoamento superficial no SWMM.



Fonte: Rossman (2015).

$$Q = W \cdot \frac{1}{n} \cdot (d - d_s)^{5/3} \cdot S^{1/2} \quad (1)$$

Onde:  $W$  é largura da sub-bacia (m), sendo a largura média de escoamento;  $n$  o coeficiente de rugosidade Manning;  $d$  a profundidade da lâmina d'água (m);  $d_s$  capacidade de armazenamento (m); e  $S$  a declividade média da bacia (m/m).

Cabe ressaltar que quanto ao processo infiltração, o SWMM permite selecionar três modelos: o de Horton; o método *Green-Ampt*; e o método Número de Curva (*Curve-number* – CN) do Serviço Nacional de Conservação de Recursos (*National Resources Conservation Service* – NRCS) dos Estados Unidos. Destaca-se entre esses, o método CN por deplecionar o evento de chuva em função da precipitação acumulada e da capacidade de infiltração remanescente de acordo com o uso da superfície e o tipo do solo, por conta disso é amplamente utilizado (Rossman, 2015).

Além disso, o transporte de água é direcionado pelos métodos de conservação de massa e da quantidade de movimento dentro de três metodologias hidráulicas de transporte, a depender da precisão desejada pelo usuário: o Fluxo em Regime Uniforme; a Onda Cinemática; e Onda Dinâmica. Sendo este último o modelo de translação do hidrograma chuva-vazão mais completo, pois representa os efeitos de remanso e ressalto hidráulico, podendo ser aplicado em traçados e cenários variados de um sistema de drenagem (Rossman, 2015).

Ademais, de acordo com Martins (2017), para a implementação da Drenagem Urbana Sustentável, o SWMM contempla oito tipos de dispositivos LID: células de biorretenção, jardins de chuva, telhados verdes, trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis, microreservatórios, desconexão telhado-calha, e valas vegetadas. De maneira que, ambas as tecnologias são representas em cinco camadas horizontais dentro do modelo de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Camadas utilizadas na modelagem de controles LID.

| Camada     | Descrição                                                                                                                                                                                                 |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Superfície | Recebe diretamente a precipitação e o escoamento das áreas de montante, armazena o excesso de afluência em depressões, e gera escoamentos que afluem para o sistema de drenagem ou para áreas de jusante; |
| Pavimento  | Pavimento poroso ou blocos de pavimentação e material de preenchimento usado em sistemas modulares;                                                                                                       |
| Solo       | preparado para manter o crescimento vegetal;                                                                                                                                                              |

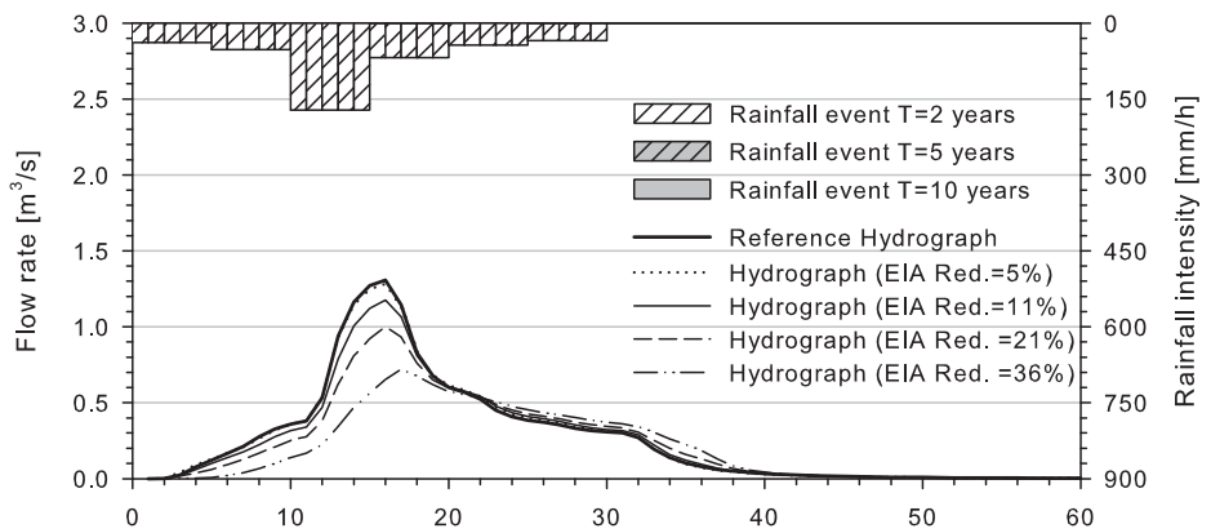
|               |                                                                                                                       |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Armazenamento | leito de britas, seixos ou cascalhos como material drenante.<br>Em microreservatórios, representa a própria cisterna; |
| Dreno         | Saída de água da camada de armazenamento para o sistema ou área a jusante.                                            |

Fonte: Adaptada, Rossman (2015).

Tendo como base as análises hidrológicas possibilitadas pelo modelo computacional do SWMM, diversos estudos comprovaram sua eficácia na representação da chuva dentro de uma determinada sub-bacia em condições variadas.

Palla e Gnecco (2015) utilizaram o modelo para analisar o desempenho hidrológico dos telhados verdes e pavimentos permeáveis na escala de captação urbana na cidade de Gênova, na Itália. Ao calibrar o modelo em diferentes cenários de tempo de retorno e cobertura da área impermeável, foi constatada que a redução do pico de vazão é afetada pela capacidade de retenção da bacia hidrográfica, enquanto o atraso do hidrograma é independente da intensidade da chuva para eventos de alta frequência, como mostra a Figura 10.

Figura 10 – Comparação entre o hidrograma de referência e os hidrogramas simulados em diferentes cenários de cobertura por telhados verdes.



Fonte: Palla e Gnecco (2015).

De maneira análoga, ao utilizar o SWMM para investigar o desempenho hidrológico dos telhados verdes modelados na cidade de Kopargaon, Índia, Paithankar e Taji (2020) verificaram que o coeficiente “n” de Manning, a largura e a inclinação da

bacia hidrográfica são os parâmetros mais sensíveis na análise do pico de vazão e do volume de escoamento. Além disso, os autores indicaram que ao aumentar a profundidade da camada de armazenamento, ocorrem maiores reduções nas taxas de escoamento superficial.

Outro aspecto observado foi a variabilidade dos resultados ao se considerar os diferentes critérios de modelagem adotados por cada trabalho, como mostra os estudos de Sousa et al. (2021), em sua modelagem de telhados verdes na sub-bacia PD14 da cidade de Teresina, Piauí. Na medida em que diversos parâmetros devem ser levados em conta, variando de acordo com a área de estudo e com os cenários propostos priorizando aqueles mais realistas, não há um padrão exato para a modelagem.

Assim, o EPA SWMM fornece as condições necessárias para uma análise na escala urbana do comportamento da chuva em bacias hidrográficas. No entanto, o usuário deve estar atento aos parâmetros de entrada e aos procedimentos de cálculo do modelo, com o intuito de simular os cenários mais realistas possíveis a depender da área de estudo e das informações disponíveis.

### 3.3 VIABILIDADE ECONÔMICA DOS TELHADOS VERDES

Além do amortecimento dos picos de vazões e do volume escoado sob o aspecto hidrológico, o conceito LID preconiza a diminuição dos custos de implantação das técnicas de drenagem, tornando a intervenção sustentável. De acordo com Canholi (2005), um dos obstáculos para aceitação desses dispositivos está relacionado ao caráter privado que passa a ter a geração do escoamento superficial, já que os ganhos são majoritariamente públicos após a introdução desses sistemas.

Dessa forma, embora os benefícios imediatos das técnicas compensatórias sejam secundários, como o aumento do valor agregado na propriedade, através da sua implantação em larga escala, o poder público consegue diminuir os gastos com a introdução, manutenção e operação dos sistemas convencionais. Nesse sentido, incentivos fiscais por parte da administração pública são justificados a fim de potencializar a introdução desses dispositivos e, ao mesmo tempo, reduzir os custos do empreendedor privado (Canholi, 2005; Liberalesso, Silva e Cruz, 2024).

Ainda assim, os custos envolvidos na implantação das técnicas compensatórias devem ser analisados, visto que a disposição errada dos materiais e a execução

incorreta pode acarretar falhas e gastos não previstos no planejamento, o que pode levar a não adoção dessas práticas. Hekrle et al. (2023) afirmam que os investidores carecem de informações reais abrangentes sobre os dispositivos, pois ainda são poucos os trabalhos que estabelecem padrões técnicos para sua implementação.

Ainda de acordo com Hekrle et al. (2023), isso resultou no aumento da demanda por uma avaliação econômica confiável que inclua a quantificação dos custos e benefícios de estudos de caso reais. Nesse contexto, a análise de custo-benefício pode ser uma boa ferramenta para avaliar o valor econômico dos projetos com telhados verdes, por meio da comparação entre alternativas concorrentes, por exemplo, diferentes tipos de telhados em um edifício.

Sob tal perspectiva, os estudos de Borges et al. (2022) realizaram uma avaliação mercadológica comparando diferentes técnicas de cobertura na cidade de Teresina, Piauí, e apontaram que o telhado verde possui um alto valor inicial de implantação, sem considerar os custos com irrigação e manutenção. Os autores afirmam ainda que a sobrecarga na estrutura de suporte do telhado deve ser levada em conta. Tais fatores representam barreiras que podem pesar na escolha dessa tecnologia como alternativa sustentável para mitigar os efeitos negativos da urbanização.

No entanto, as observações acerca do valor econômico, até o presente momento, ainda são baseadas principalmente em estudos de caso parciais influenciados pela abordagem individual. Por conseguinte, o uso dos resultados para a tomada de decisão é significativamente limitado (Hekrle et al., 2023).

Cabe ressaltar que a composição de custos de todos os serviços encontrados deve ter boas fontes de pesquisa para que se obtenha um orçamento com máxima precisão e confiabilidade. Uma das formas de buscar as composições de serviços e custos unitários é através de bancos de dados oficiais como o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices (SINAPI), a Secretaria de Infraestrutura do Ceará (Seinfra), o Sistema de Orçamento de Obras de Sergipe (Orse), entre outros (Borges et al., 2022).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho tomou como base a metodologia descrita nos trabalhos de Palla e Gnecco (2015), Martins (2017), Paithankar e Taji (2020), Pedrosa (2021) e Sousa et al. (2021), em que o modelo do SWMM foi utilizado para análise computacional do desempenho hidrológico de bacias hidrográficas, comparando um cenário impermeabilizado com a implementação de telhados verdes em diferentes porcentagens de cobertura.

Inicialmente, foram levantadas as propriedades da área de estudo do loteamento fornecidas pelo projeto original e pelo Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina – PDDrU (Teresina, 2010). Em seguida, os dados de precipitação foram quantificados de acordo com o modelo de chuva sintética recomendado pelo referido PDDrU, bem como pelo Manual de Drenagem de Teresina (Teresina, 2011).

Assim, tais parâmetros foram inseridos na modelagem, prosseguido pela implantação dos controles LID seguindo as indicações de Rossman (2015), a fim de dimensionar uma microbacia o mais realista possível com o cenário tradicional e o proposto pelas técnicas compensatórias.

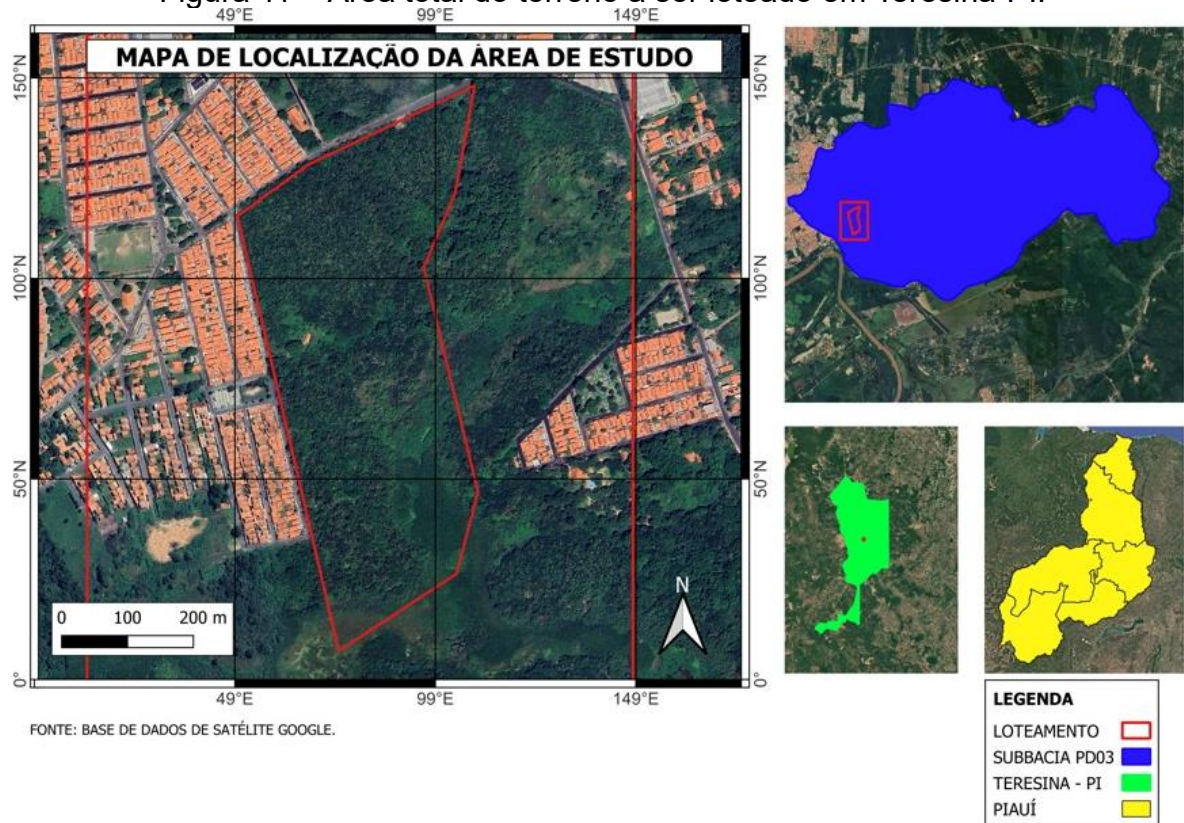
Por fim, foram retirados os resultados da simulação computacional e avaliado o comportamento hidrológico dos telhados verdes. Adicionado a isso, com base no modelo dimensionado, os quantitativos de materiais e serviços necessários para a construção desses dispositivos foram calculados e comparados com o telhamento em fibrocimento, proposto originalmente, para averiguar a viabilidade econômica dos dispositivos LID.

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

Para a modelagem computacional dos telhados verdes e o estudo de viabilidade econômica de sua implementação, utilizou-se a planta de um loteamento residencial e comercial projetado no bairro São Sebastião, zona Sudeste da capital Teresina, como mostra a Figura 11.



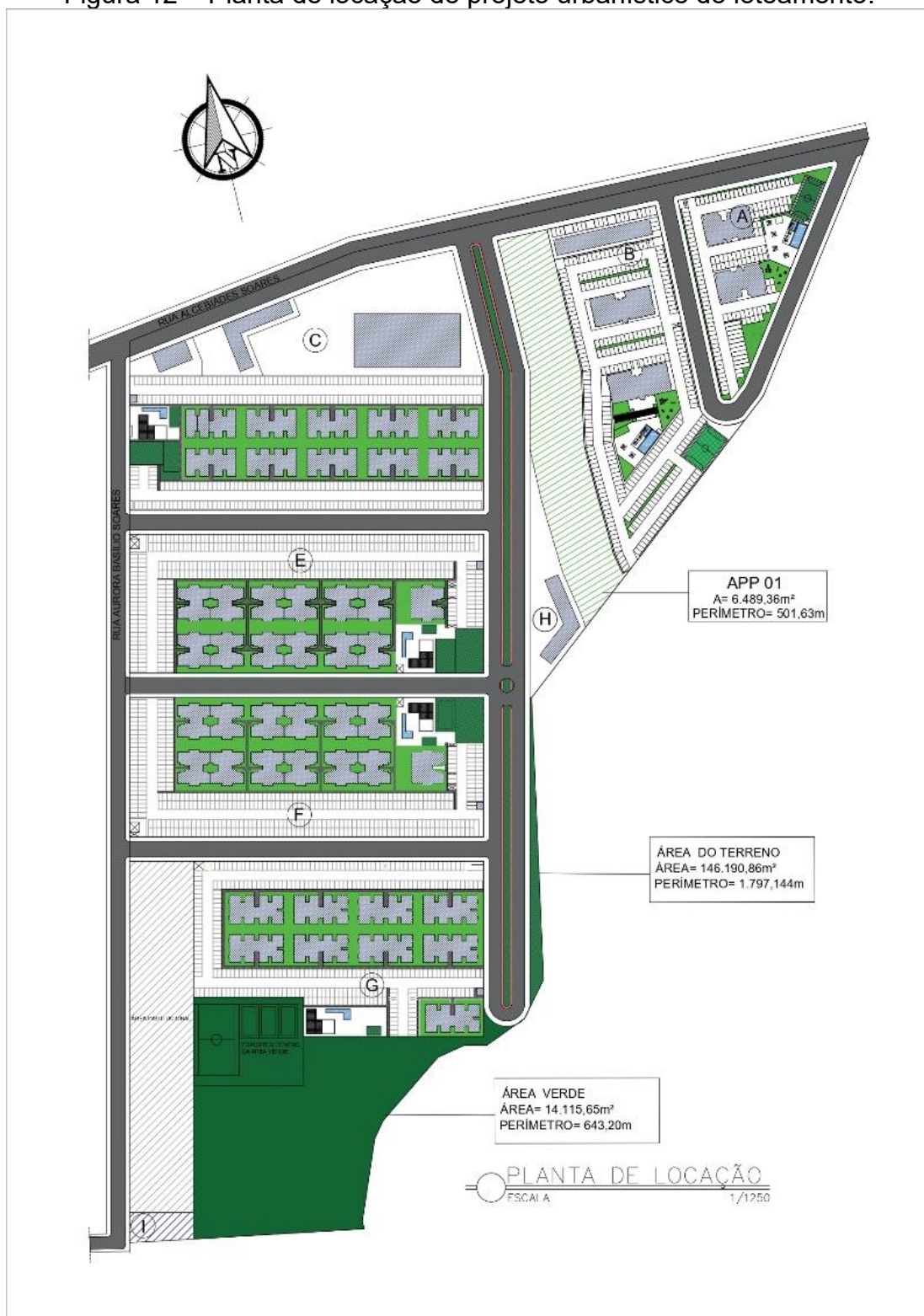
Figura 11 – Área total do terreno a ser loteado em Teresina-PI.



Fonte: Adaptada, Acervo da Construtora (2024); Teresina (2010); IBGE (2022).

A área total do terreno utilizado é de 146.190,86 m<sup>2</sup>, dividida em área loteável, vias de circulação interna, áreas verdes, área institucional, área de proteção permanente (APP) e área de infraestrutura conforme a Tabela 2 e a Figura 12. Observa-se ainda que, conforme a Tabela 3, 103.570,88 m<sup>2</sup>, cerca de 70,85% da área total do loteamento, correspondem à parcela de área impermeável, da qual 21.732,10 m<sup>2</sup> é coberta por telhado de fibrocimento, segundo o projeto original, que será convertido por telhados verdes como mostra a Figura 13.

Figura 12 – Planta de localização do projeto urbanístico do loteamento.



Fonte: Adaptada, Acervo da Construtora (2024).

Tabela 2 – Descrição geral das áreas do loteamento.

| <b>Descrição</b>                     | <b>Área (m²)</b> | <b>%</b> |
|--------------------------------------|------------------|----------|
| Área Total do Terreno                | 146.190,96       | 100,00   |
| Área de Preservação Permanente (APP) | 6.366,23         | 4,35     |
| Área Verde                           | 14.118,12        | 9,66     |
| Área Institucional                   | 7.142,40         | 4,89     |
| Vias de Circulação                   | 28.250,29        | 19,32    |
| Quadra A                             | 5.962,94         | 4,08     |
| Quadra B                             | 11.528,73        | 7,89     |
| Quadra C                             | 8.391,20         | 5,74     |
| Quadra D                             | 15.140,00        | 10,36    |
| Quadra E                             | 15.700,00        | 10,74    |
| Quadra F                             | 15.700,00        | 10,74    |
| Quadra G                             | 15.700,00        | 10,74    |
| Quadra H                             | 15.700,00        | 10,74    |
| Quadra I                             | 577,27           | 0,39     |

Fonte: Adaptada, Acervo da Construtora (2024).

Tabela 3 – Quadro resumo quanto à permeabilidade das áreas do loteamento.

| <b>Característica</b> | <b>Área (m²)</b> | <b>%</b> |
|-----------------------|------------------|----------|
| Permeável             | 42.619,98        | 70,85    |
| Impermeável           | 103.570,88       | 29,15    |

Fonte: Adaptada, Acervo da Construtora (2024).

Figura 13 – Destaque da área de telhados como área de estudo.

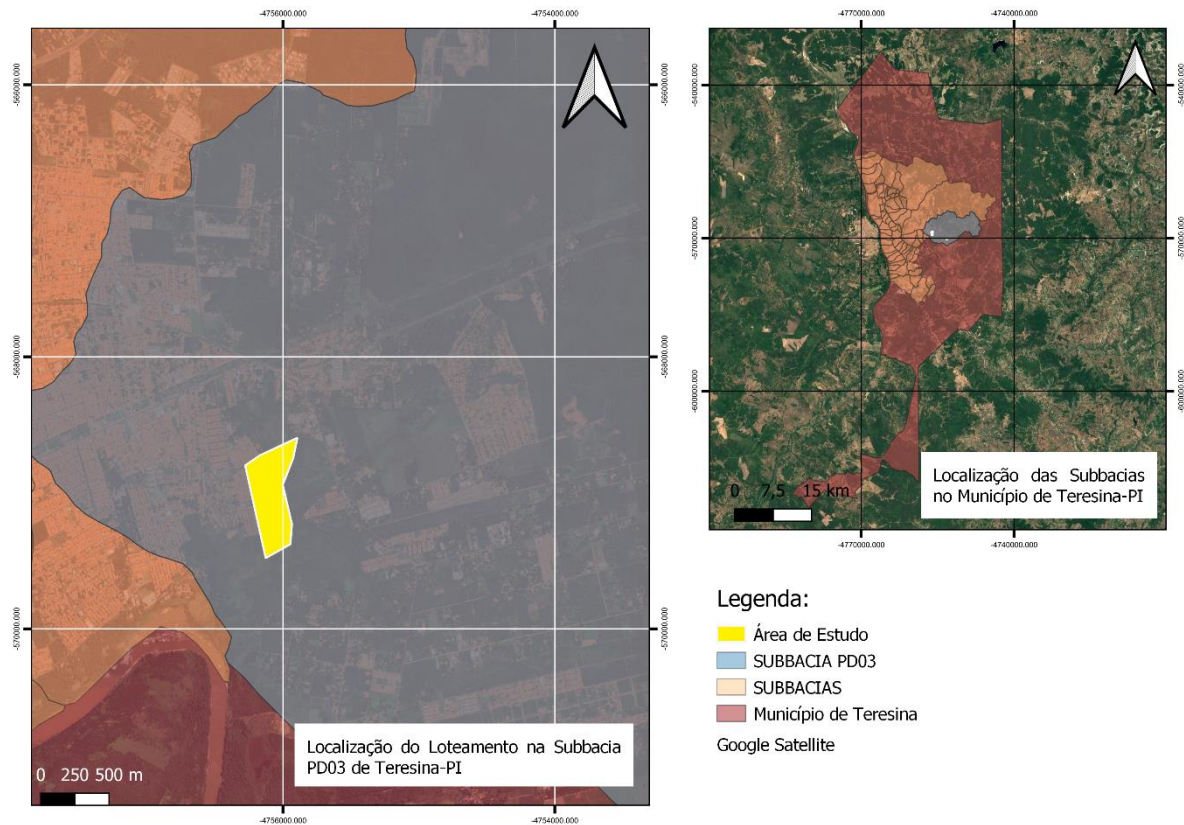


Fonte: Adaptada, Acervo da Construtora (2024).

Ademais, de acordo com o PDDrU (Teresina, 2010), o loteamento em estudo encontra-se na sub-bacia PD03, como mostra a Figura 14, estando em uma região de latossolos amarelos (68%) e alissolos (32%) caracterizando o grupo hidrológico B, de modo que o efeito combinado de urbanização da foz, com solos mais impermeáveis na cabeceira contribui para aumentar o escoamento superficial.



Figura 14 – Localização do loteamento na sub-bacia PD03.



Fonte: Adaptada, Acervo da Construtora (2024); Teresina (2010); IBGE (2022).

## 4.2 DADOS DE PRECIPITAÇÃO

O PDDrU usa os dados hidrológicos das áreas de estudos para determinar, através do método de Schaake descrito na Equação 2, o tempo de concentração de cada sub-bacia. Assim, aplicando os dados do loteamento em estudo, obteve-se um tempo de concentração de 10,27 minutos.

$$tc = \frac{4,968 \times L^{0,24}}{S^{0,16} \times Aimp^{0,26}} \quad (2)$$

Onde: tc é o tempo de concentração em minutos, L o comprimento médio do talvegue em km, S a declividade média da sub-bacia em m/m e Aimp a fração de área impermeável.

O PDDrU (Teresina 2010), no que diz respeito à duração da chuva de projeto, recomenda o uso de valores no mínimo uma vez e meia maior que o tempo de

concentração da bacia analisada. Além disso, quando o projeto envolve reservatórios, detenções e dispositivos de controle na fonte, o tempo de duração da chuva não pode ser utilizado igual ao tempo de concentração da bacia, erro comum dos projetistas no Brasil.

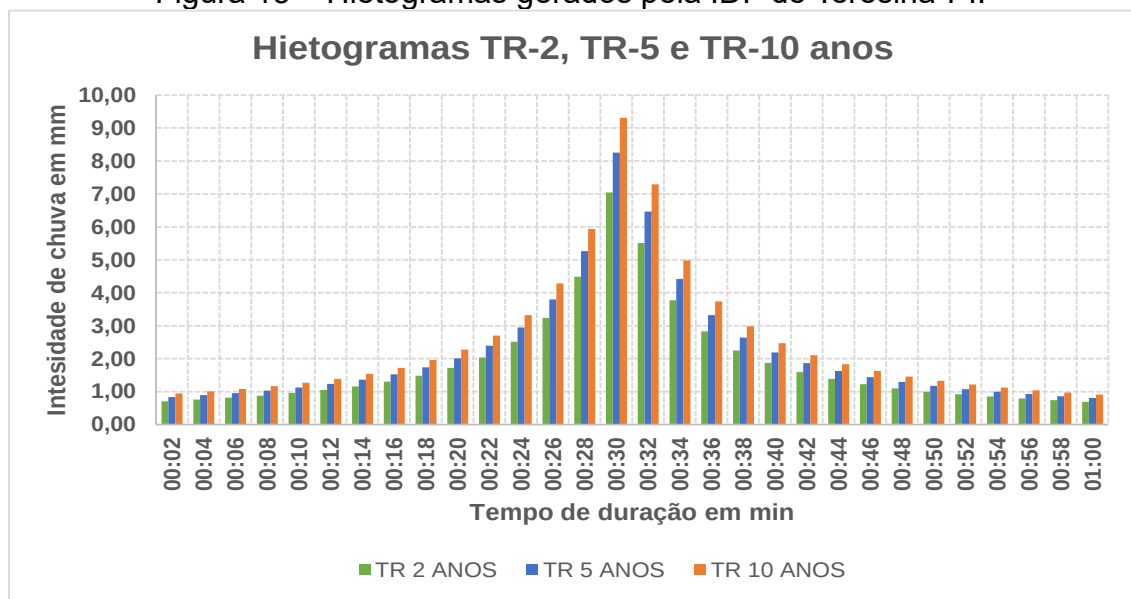
Logo, os eventos de chuva sintética foram dimensionados utilizando a equação genérica para as curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) de Teresina, mostrada na Equação 3, determinada pelo PDDrU (Teresina, 2010). Considerou-se os tempos de recorrência  $T$  de 2, 5 e de 10; e uma duração de chuva  $t$  de 60 minutos.

$$i = \frac{1194,237 \times T^{0,1738}}{(t+10)^{0,7457}} \quad (3)$$

Sendo ( $i$ ) a intensidade da chuva em mm/h, ( $T$ ) o período de retorno em anos e ( $t$ ) o tempo de concentração da bacia em min.

O intervalo de tempo considerado para a discretização da chuva de projeto foi determinado, considerando um intervalo de tempo aproximadamente igual a um quinto do tempo de concentração da microbacia, ou seja, 2 minutos. Logo, as intensidades maiores foram distribuídas no meio do intervalo de duração em blocos alternados para análise de escoamento, gerando assim os hietogramas de entrada do modelo chuva-vazão mostrados na Figura 15, semelhante à metodologia adotada pelo PDDrU (2010).

Figura 15 – Hietogramas gerados pela IDF de Teresina-PI.



Fonte: Autor (2024).

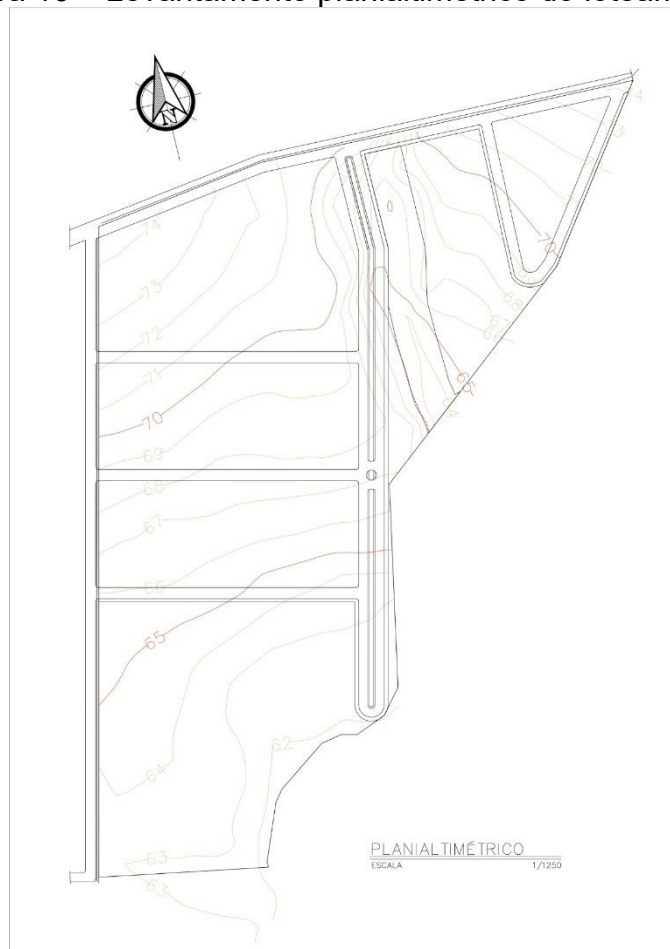
### 4.3 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NO EPA SWMM

Com base nas informações da área de estudo dispostas pelo projeto, foi possível determinar os parâmetros de entrada para o dimensionamento da microbacia que representou a área do loteamento de acordo com as recomendações do Manual de Drenagem de Teresina (Teresina, 2011) e do Manual do SWMM (Rosman, 2015).

#### 4.3.1 Determinação da declividade

O cálculo da declividade da microbacia do loteamento levou em consideração as cotas fornecidas pelo levantamento planialtimétrico exposto na Figura 16. Primeiramente, o talvegue principal foi determinado de maneira a se aproximar do das vias traçadas no projeto urbanístico. Como as cotas mínima e máxima do trecho são respectivamente 74 m e 62 m, obteve-se como resultado 1,29% de inclinação.

Figura 16 – Levantamento planialtimétrico do loteamento.



Fonte: Adaptada, Acervo da Construtora (2024).

### 4.3.2 Largura de Escoamento Superficial

De acordo com Rossman (2015), o valor da largura é calculado dividindo a área da sub-bacia pelo valor médio do comprimento máximo de escoamento superficial, que por sua vez, trata-se do caminho percorrido pela água superficial do ponto mais distante da microbacia até a canalização do escoamento proposta. Dessa forma, Comprimentos máximos correspondentes a vários caminhos de escoamento superficial devem ser calculados, obtendo-se uma média.

Nesse sentido, Brenes, Vega e Hack (2022) afirmam que a largura idealizada pode ser determinada com a representação de um retângulo, em que, para uma área igual, uma largura maior resultará em uma resposta mais rápida da bacia, enquanto uma largura menor resultará em uma resposta mais lenta da bacia.

Assim, como o talvegue se encontra próximo da extremidade da microbacia, a largura do escoamento obtida através da média de uma série de aferições, foi próxima ao comprimento do canal principal, cerca de 961 m, em concordância com os estudos de referência citados na presente metodologia.

### 4.3.3 Coeficiente n de Manning

Conforme Rossman (2015), a rugosidade no cálculo da vazão de escoamento considera o coeficiente “n” de Manning, de acordo com a Tabela 4, para cada tipo de área. Para o presente estudo, foram adotados os valores considerando o pior cenário para áreas permeáveis e impermeáveis.

Tabela 4 – Coeficiente n de Manning para escoamentos em superfície livre.

| <b>Superfície</b>                    | <b>n</b> |
|--------------------------------------|----------|
| Asfalto liso                         | 0,011    |
| Concreto liso                        | 0,012    |
| Concreto normal                      | 0,013    |
| Madeira                              | 0,014    |
| Tijolo com cimento                   | 0,015    |
| Ferro fundido                        | 0,015    |
| Tubos de metal ondulado              | 0,024    |
| Cimento com superfície de pedregulho | 0,024    |



|                               |      |
|-------------------------------|------|
| Solo em pousio                | 0,05 |
| Solo coberto de resíduos <20% | 0,06 |
| Solo coberto de resíduos >20% | 0,17 |
| Gramma curta, padaria         | 0,15 |
| Gramma densa                  | 0,24 |
| Gramma-bermudas               | 0,41 |
| Vegetação rasteira livre      | 0,40 |
| Vegetação rasteira densa      | 0,80 |

Fonte: Adaptada, Rossman (2015); SCS (1986); McCuen (1989).

#### 4.3.4 Armazenamento em depressões

Seguindo as recomendações de Rossman (2015), foram adotados valores medianos para a profundidade de armazenamento em depressões para o cálculo de escoamento em áreas permeáveis e impermeáveis como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Profundidade de armazenamento em depressões.

| <b>Superfície</b>         | <b>mm</b>   |
|---------------------------|-------------|
| Superfícies impenetráveis | 1,27 – 2,54 |
| Gramados                  | 2,54 – 5,08 |
| Pastagem                  | 5,08        |
| Serrapilheira             | 7,62        |

Fonte: Adaptada, Rossman (2015); ASCE (1992).

#### 4.3.5 Parâmetro de Infiltração

Para o cálculo de infiltração adotou-se o modelo CN-NRCS, com base no tipo de solo e no percentual de impermeabilização fornecidos pelos dados da área de estudo. Utilizando a tabela mostrada na Figura 17, obteve-se um CN médio ponderado de 90 para o cenário diagnóstico, assim como indicado por Martins (2017).

Figura 17 – Tabela de valores dos parâmetros CN para os solos tipo A, B, C e D.

| Cover description                                                                                                                          | Average percent<br>impervious area <sup>2/</sup> | Curve numbers for<br>hydrologic soil group |    |    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|----|----|----|
|                                                                                                                                            |                                                  | A                                          | B  | C  | D  |
| Cover type and hydrologic condition                                                                                                        |                                                  |                                            |    |    |    |
| <i>Fully developed urban areas (vegetation established)</i>                                                                                |                                                  |                                            |    |    |    |
| Open space (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.) <sup>3/</sup> :                                                                  |                                                  |                                            |    |    |    |
| Poor condition (grass cover < 50%) .....                                                                                                   |                                                  | 68                                         | 79 | 86 | 89 |
| Fair condition (grass cover 50% to 75%) .....                                                                                              |                                                  | 49                                         | 69 | 79 | 84 |
| Good condition (grass cover > 75%) .....                                                                                                   |                                                  | 39                                         | 61 | 74 | 80 |
| Impervious areas:                                                                                                                          |                                                  |                                            |    |    |    |
| Paved parking lots, roofs, driveways, etc.<br>(excluding right-of-way) .....                                                               |                                                  | 98                                         | 98 | 98 | 98 |
| Streets and roads:                                                                                                                         |                                                  |                                            |    |    |    |
| Paved; curbs and storm sewers (excluding<br>right-of-way) .....                                                                            |                                                  | 98                                         | 98 | 98 | 98 |
| Paved; open ditches (including right-of-way) .....                                                                                         |                                                  | 83                                         | 89 | 92 | 93 |
| Gravel (including right-of-way) .....                                                                                                      |                                                  | 76                                         | 85 | 89 | 91 |
| Dirt (including right-of-way) .....                                                                                                        |                                                  | 72                                         | 82 | 87 | 89 |
| Western desert urban areas:                                                                                                                |                                                  |                                            |    |    |    |
| Natural desert landscaping (pervious areas only) <sup>4/</sup> .....                                                                       |                                                  | 63                                         | 77 | 85 | 88 |
| Artificial desert landscaping (impervious weed barrier,<br>desert shrub with 1- to 2-inch sand or gravel mulch<br>and basin borders) ..... |                                                  | 96                                         | 96 | 96 | 96 |
| Urban districts:                                                                                                                           |                                                  |                                            |    |    |    |
| Commercial and business .....                                                                                                              | 85                                               | 89                                         | 92 | 94 | 95 |
| Industrial .....                                                                                                                           | 72                                               | 81                                         | 88 | 91 | 93 |
| Residential districts by average lot size:                                                                                                 |                                                  |                                            |    |    |    |
| 1/8 acre or less (town houses) .....                                                                                                       | 65                                               | 77                                         | 85 | 90 | 92 |
| 1/4 acre .....                                                                                                                             | 38                                               | 61                                         | 75 | 83 | 87 |
| 1/3 acre .....                                                                                                                             | 30                                               | 57                                         | 72 | 81 | 86 |
| 1/2 acre .....                                                                                                                             | 25                                               | 54                                         | 70 | 80 | 85 |
| 1 acre .....                                                                                                                               | 20                                               | 51                                         | 68 | 79 | 84 |
| 2 acres .....                                                                                                                              | 12                                               | 46                                         | 65 | 77 | 82 |
| <i>Developing urban areas</i>                                                                                                              |                                                  |                                            |    |    |    |
| Newly graded areas<br>(pervious areas only, no vegetation) <sup>5/</sup> .....                                                             |                                                  |                                            |    |    |    |
|                                                                                                                                            |                                                  | 77                                         | 86 | 91 | 94 |
| Idle lands (CN's are determined using cover types<br>similar to those in table 2-2c).                                                      |                                                  |                                            |    |    |    |

<sup>1</sup> Average runoff condition, and  $I_a = 0.2S$ .

<sup>2</sup> The average percent impervious area shown was used to develop the composite CN's. Other assumptions are as follows: impervious areas are directly connected to the drainage system, impervious areas have a CN of 98, and pervious areas are considered equivalent to open space in good hydrologic condition. CN's for other combinations of conditions may be computed using figure 2-3 or 2-4.

<sup>3</sup> CN's shown are equivalent to those of pasture. Composite CN's may be computed for other combinations of open space cover type.

<sup>4</sup> Composite CN's for natural desert landscaping should be computed using figures 2-3 or 2-4 based on the impervious area percentage (CN = 98) and the pervious area CN. The pervious area CN's are assumed equivalent to desert shrub in poor hydrologic condition.

<sup>5</sup> Composite CN's to use for the design of temporary measures during grading and construction should be computed using figure 2-3 or 2-4 based on the degree of development (impervious area percentage) and the CN's for the newly graded pervious areas.

Fonte: Adaptada, SCS (1986).

Em resumo, para o cenário diagnóstico, foram adotados na microbacia do loteamento as propriedades de entrada expostas na Tabela 6. Quanto aos cenários prognósticos, os valores da área impermeável, largura de escoamento e CN foram recalculados devido a conversão da parcela impermeável, correspondente à área de telhados, pelos telhados verdes seguindo as recomendações de Palla e Gnecco (2015); Martins (2017); e Pedrosa, (2021).

Tabela 6 – Resumo das propriedades de entrada da microbacia do loteamento.

| <b>Propriedade</b>                                    | <b>Valor</b> |
|-------------------------------------------------------|--------------|
| Área (ha)                                             | 14,62        |
| Largura (m)                                           | 961,31       |
| Declividade (%)                                       | 1,29         |
| % Área Impermeável                                    | 70,85        |
| n Maning - Impermeável                                | 0,013        |
| n Maning - Permeável                                  | 0,015        |
| Profund. de armazen. em depressões – Impermeável (mm) | 1,50         |
| Profund. de armazen. em depressões – Permeável (mm)   | 3,00         |
| % de área impermeável sem armazenamento (%)           | 25           |
| CN                                                    | 90           |

Fonte: Autor (2024).

#### 4.4 IMPLEMENTAÇÃO DOS TELHADOS VERDES

Após o diagnóstico da simulação para o cenário sem implementação dos telhados verdes, destacaram-se os valores de pico da vazão e do volume de escoamento superficial. Em seguida, foram simulados os cenários prognósticos adicionando controles LID na microbacia ocupando 100% e 25% da área de telhados, proposta ideal e mais conservadora respectivamente, para simular a sensibilidade da intervenção, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 – Áreas de implementação dos telhados verdes nos diferentes cenários.

| <b>Cenário</b>       | <b>Área de Telhados Tratada</b> | <b>Área Impermeável sem Tratamento</b> | <b>% Impermeável sem Tratamento</b> |
|----------------------|---------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|
| Diagnóstico          | 0,00 ha                         | 10,36 ha                               | 70,85%                              |
| 25% Telhados Verdes  | 0,54 ha                         | 9,82 ha                                | 67,13%                              |
| 100% Telhados Verdes | 2,17 ha                         | 8,19 ha                                | 55,98%                              |

Fonte: Autor (2024).

Para tanto, os telhados verdes foram dimensionados utilizando o módulo de dispositivos LID do SWMM, adotando os parâmetros indicados na Tabela 8. Esses valores foram atribuídos levando em conta as recomendações de Rossman (2015), e as condições observadas nos estudos de Martins (2017); Pedrosa (2021); Sousa et al. (2021); e Barbosa et al. (2023).

Tabela 8 – Parâmetros de controle LID utilizados para telhados verdes no SWMM.

| <b>Parâmetro</b>                        | <b>Unidade</b> | <b>Valor</b> |
|-----------------------------------------|----------------|--------------|
| <b>Superfície</b>                       |                |              |
| Armazenamento                           | mm             | 500,00       |
| Volume de vegetação                     | %              | 0,90         |
| Rugosidade (n)                          | -              | 0,10         |
| Declividade                             | %              | 1,00         |
| <b>Solo</b>                             |                |              |
| Espessura                               | mm             | 100,00       |
| Porosidade                              | %              | 0,44         |
| Capacidade de campo                     | mm             | 0,11         |
| Ponto de murcha                         | %              | 0,05         |
| Condutividade Hidráulica                | mm/hr          | 3,00         |
| Declividade da Condutividade Hidráulica | %              | 10,00        |
| Sucção capilar                          | mm             | 2,40         |
| <b>Dreno</b>                            |                |              |
| Espessura                               | mm             | 50,00        |
| Fração de vazios                        | -              | 0,50         |
| Rugosidade n                            | mm             | 0,10         |

Fonte: Autor (2024).

Os parâmetros supracitados dimensionam telhados verdes do tipo extensivo, que por serem mais facilmente construídos na prática, exigindo menos manutenção e

menores cargas atuantes nas estruturas de suporte, comparando aos demais modelos desse dispositivo (Martins, 2017).

Logo, seguindo o projeto das edificações do loteamento, foi adotado um telhado de 15 cm de espessura, sendo 5 cm composto por material drenante (brita Nº 19) como camada drenante protegida por manta geotêxtil, e 10 cm de substrato (areia vegetal ou solo natural) coberto por vegetação, seguindo a inclinação de 1% da laje de concreto armado impermeabilizada da cobertura.

Martins (2017) ressalta que os manuais de técnicas compensatórias utilizados em países como Canadá, Austrália e Estados Unidos, bem como no Brasil no estado de São Paulo e Rio Grande do Sul, não impõem restrições quanto ao uso dos dispositivos, tendo em vista que podem ser instalados de diversas formas e materiais.

#### 4.5 ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Para análise do escoamento superficial e do volume resultante no exutório da microbacia do loteamento, por meio do método de Onda Dinâmica, foram gerados os hidrogramas e o relatório de escoamento superficial no SWMM. O tempo de análise de escoamento foi de 120 minutos levando em conta a área do projeto, de modo a se observar os eventuais atrasos na modelagem numérica do escoamento pelos controles LID, semelhante ao adotado por Sousa et al. (2021).

#### 4.6 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

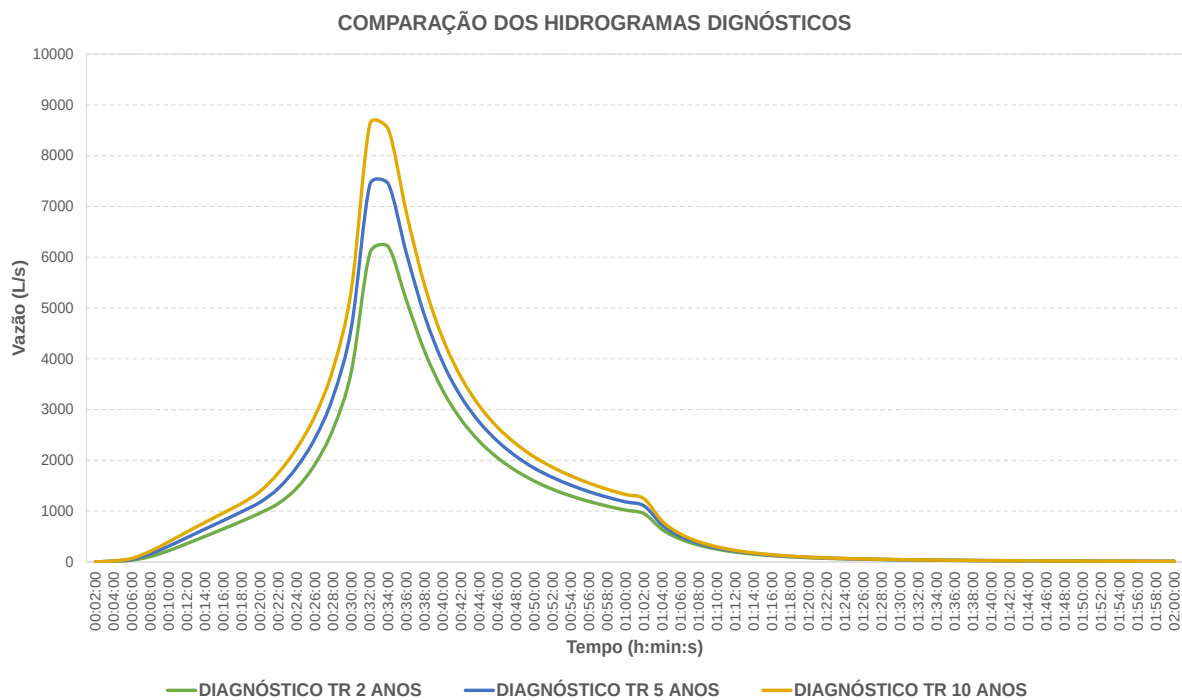
No que se refere à viabilidade econômica dos telhados verdes, os custos diretos com materiais e mão de obra necessários para a construção dos dispositivos foram levantados de acordo com a metodologia apontada por Martins (2017) e Borges et al. (2022). Desse modo, a base de cálculo teve como fontes as composições de custo do relatório de preços de serviços e insumos do SINAPI/PI e Seinfra/CE com referência de junho/2024, sendo o primeiro priorizado devido a regionalidade.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NO EPA SWMM

A Figura 18 mostra os hidrogramas resultantes dos cenários diagnósticos, sem a implementação dos telhados verdes. Considerando os TR de 2, 5 e 10 anos, foi possível constatar que, em ambos os casos, o escoamento superficial atingiu o pico aos 00:34:00 minutos, chegando aos valores de 6.209,78; 7.447,07; e 8.620,57 (L/s), respectivamente. Quanto ao volume escoado no exutório da microbacia, os valores chegaram a 4,94; 6,25 e 7,41 milhões de litros na ordem de TR para 2, 5 e 10 anos.

Figura 18 – Hidrogramas dos cenários diagnósticos resultantes do SWMM.



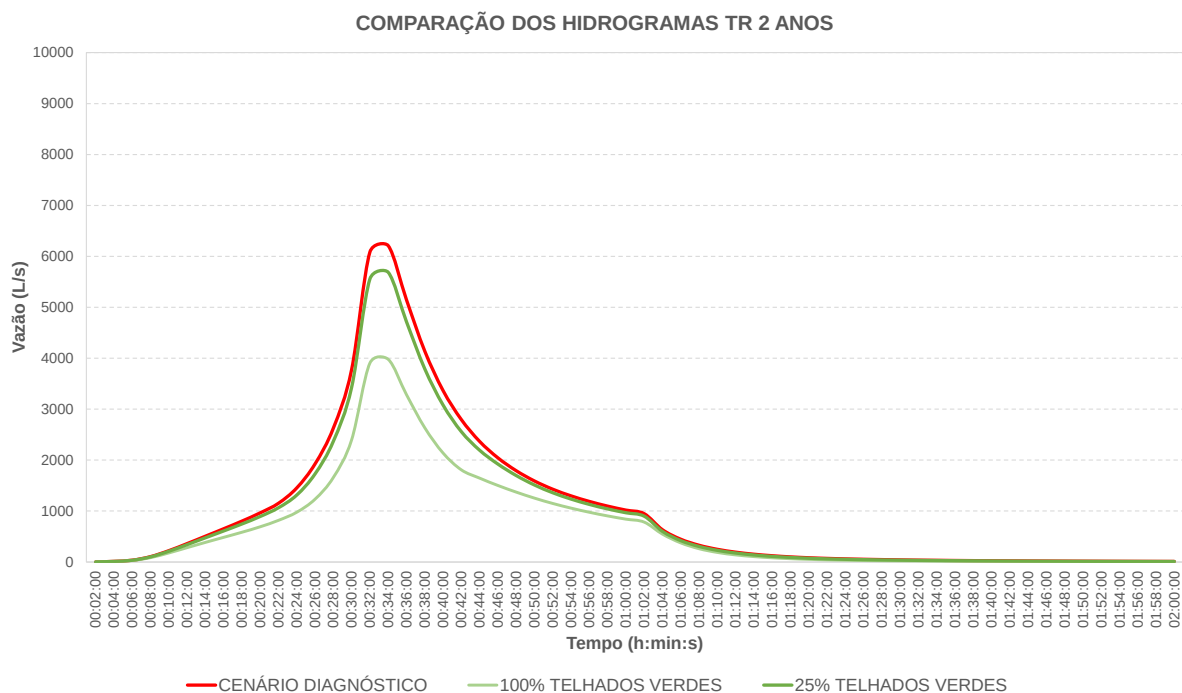
Fonte: Autor (2024).

No que tange aos resultados obtidos após a inserção dos controles LID, destacou-se a comparação entre os cenários de conversão de 100% e 25% para cada TR proposta na metodologia. Desse modo, permitiu-se observar melhor o impacto do aumento da área de cobertura do dispositivo LID em primeira análise, para considerar o impacto da intensidade dos eventos de precipitação em segunda análise.

Logo, com base na Figura 19, pode-se comparar os cenários de intervenção

em conversão completa e parcial para telhados verdes em TR de 2 anos. Para o primeiro caso, obteve-se um amortecimento do pico de vazão, comparado ao cenário sem LID, de 35,94%, enquanto que para uma cobertura parcial a redução foi de 8,39%. De maneira análoga, o escoamento superficial foi reduzido 31,40% com cobertura de 100% dos telhados, ao passo que na cobertura de 25% a diferença foi de 7,78%.

Figura 19 – Hidrogramas resultantes com TR de 2 anos retirados do SWMM.

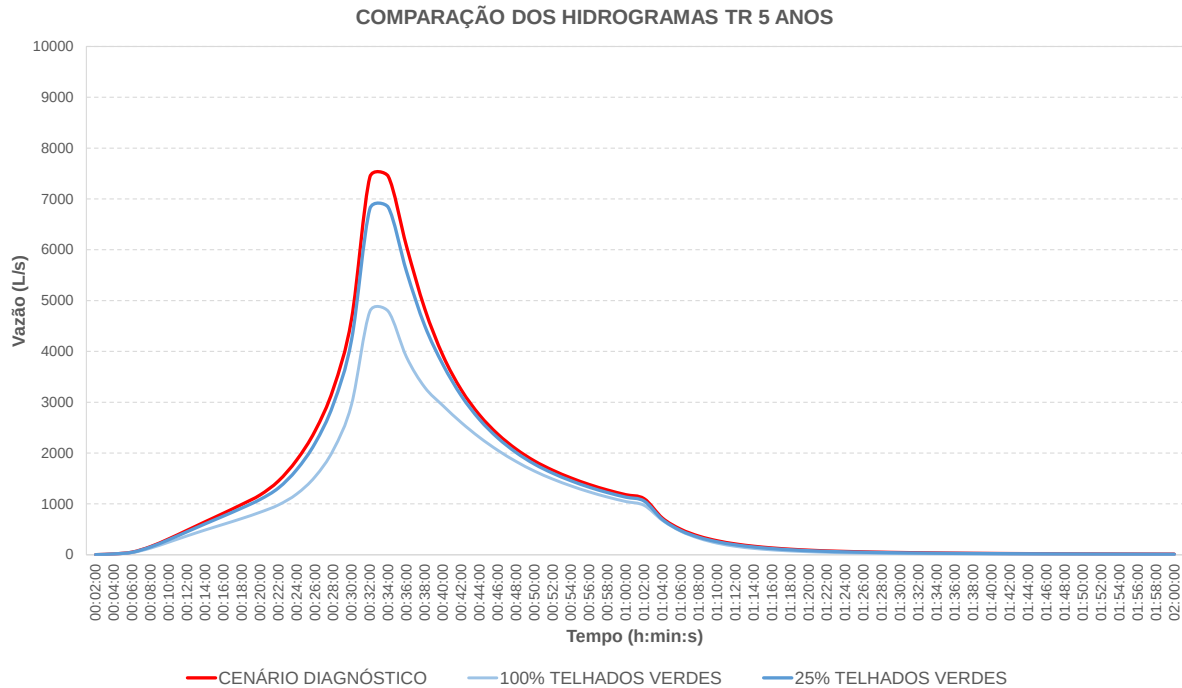


Fonte: Autor (2024).

Quanto à simulação com TR igual a 5 anos, a Figura 20 mostra os resultados dos cenários de cobertura dos telhados verdes, em que foi reduzido 35,64% do pico de vazão na conversão completa, referindo-se ao cenário diagnóstico; e 8,19% com 25% de conversão da área de telhados. Já o escoamento superficial foi mitigado em 27,25% e 6,72%, para as coberturas de 100% e 25% respectivamente.

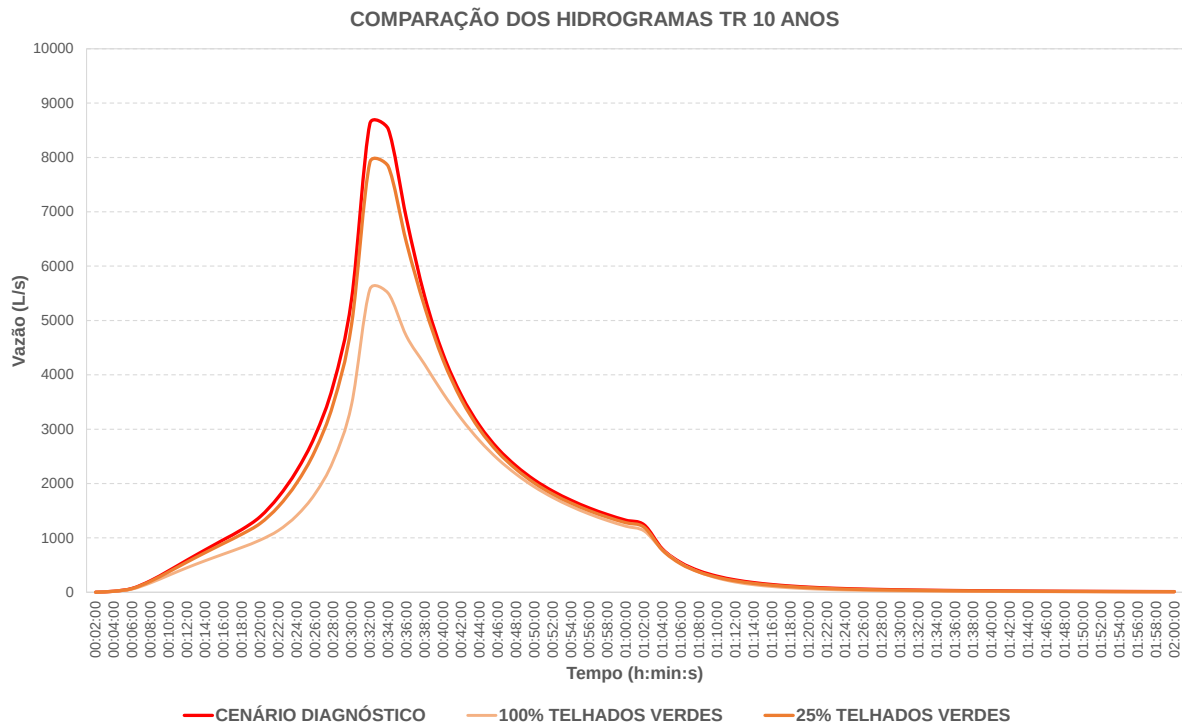
Por fim, nos cenários com aplicação de TR em 10 anos, obteve-se reduções do pico de vazão de 35,33% e 8,24% com as coberturas, respectivamente, completa e parcial. Da mesma forma, o volume escoado teve uma diminuição de 24,41% e 6,01% em ordem crescente das parcelas de cobertura por telhados verdes como mostra os hidrogramas da Figura 21 a seguir.

Figura 20 – Hidrogramas resultantes com TR de 5 anos retirados do SWMM.



Fonte: Autor (2024).

Figura 21 – Hidrogramas resultantes com TR de 10 anos retirados do SWMM.



Fonte: Autor (2024).

Dessa forma, foi observado que os valores obtidos neste estudo corroboram



com os resultados das pesquisas de referência citadas anteriormente na metodologia. Martins (2017) alcançou reduções de até 16,37% do pico de vazão e 10,51% no volume escoado superficial com a cobertura de 25% dos telhados em uma bacia relativamente urbanizada. Apesar disso, o autor não constatou atrasos no pico de vazão, semelhante ao ocorrido no presente trabalho.

Pedrosa (2021), por sua vez, constatou em parte de seus resultados um incremento no pico de vazão e no volume escoado na sub-bacia PE20 em Teresina, Piauí. O autor sustenta que o módulo dos telhados verdes possui um balanço hídrico simplificado e que, devido aos atrasos devido a retenção e o escoamento tardio pode ser mal representado e resultar em maiores escoamentos.

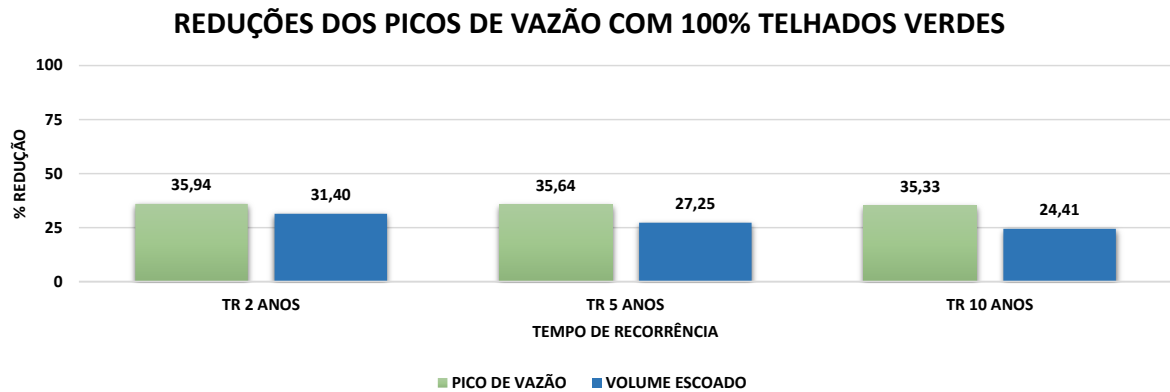
Entretanto, Martins (2017) afirma que o SWMM simula o balanço hídrico desses dispositivos não somente no módulo de controle LID, mas também no comportamento da bacia como um todo. Sendo necessário, desse modo, a alteração cuidadosa dos parâmetros de largura de escoamento e percentual de áreas permeáveis, uma vez que o modelo considera os telhados verdes como áreas permeáveis para as variáveis de rugosidade e propriedades de escoamento. Assim, como o presente estudo recalibrou as propriedades da microbacia do loteamento em cada cenário de intervenção, não houve resultados inesperados quanto ao comportamento hidrológico.

Ainda assim, como a capacidade de retenção dos telhados verdes é limitada relativamente, o incremento da percolação e evaporação pelo dispositivo é superado em pouco tempo após o início da precipitação, chegando ao estado de saturação ao extravasar o excedente para o escoamento superficial da microbacia (Pedrosa, 2021).

Baseado nisso, de modo geral, observou-se que o impacto hidrológico dos telhados verdes na microbacia é mais sensível à parcela de tratamento da área impermeabilizada e o quanto ocupa da bacia como um todo. Pois, apesar de o aumento da intensidade da chuva influenciar diretamente no desempenho dos dispositivos, sobretudo na mitigação do escoamento na saída da bacia, não houve diferenças significativas entre os resultados nos diferentes TR como se mostra nas Figuras 22 e 23.

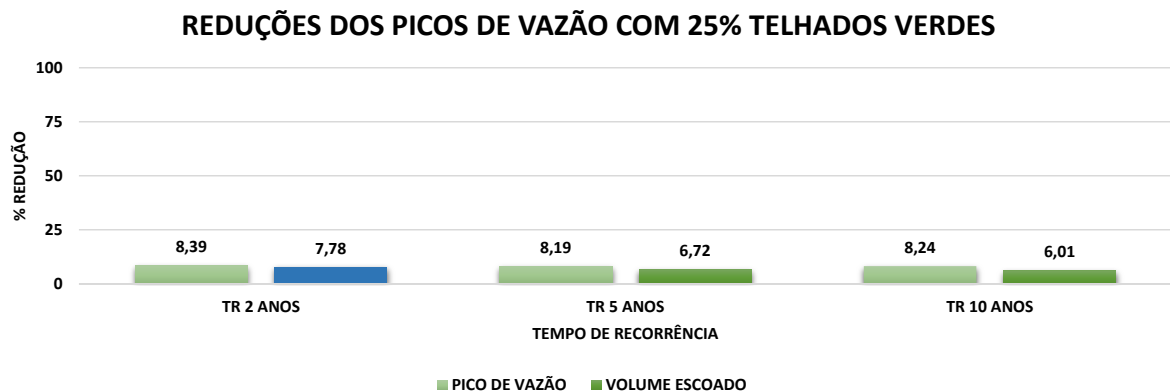
Um dos fatores que ajudam a explicar esses resultados é o tamanho do armazenamento dimensionado nos dispositivos de controle LID para o presente estudo. Já que, quanto maior a camada de armazenamento maior é a sua capacidade de suportar o aumento da intensidade de precipitação em eventos menos frequentes (Pedrosa, 2021).

Figura 22 – Comparação dos cenários de intervenção e diagnóstico em 100% de cobertura da área de telhados.



Fonte: Autor (2024).

Figura 23 – Comparação dos cenários de intervenção e diagnóstico em 25% de cobertura da área de telhados.



Fonte: Autor (2024).

No entanto, cabe salientar que a duração da chuva sintética foi adotada para 60 minutos, tempo suficiente para o extravasamento da camada de armazenamento dos dispositivos. Nesse sentido, chuvas mais curtas podem favorecer o desempenho dos telhados verdes, evitando a saturação do seu armazenamento. Além disso, a simulação de eventos com menor duração poderia assemelhar-se ainda mais ao cenário pluviométrico real da região de Teresina, com chuvas mais curtas e intensas.

Sob tal perspectiva, estudos semelhantes como Versini et al. (2015), cujas análises foram baseadas no comportamento de telhados verdes simulados em uma sub-bacia urbana de Trappes, França, foi constatada uma maior eficiência do dispositivo LID ao aumentar a cobertura da área impermeável tratada. Com os

cenários de conversão de 12,5%, 25%, 50% e 100%, os autores observaram que, na maioria dos eventos de chuva de menor intensidade de precipitação, o volume escoado foi completamente retido pelos telhados verdes. Além disso, quanto maior a duração da chuva, menor o impacto hidrológico, em termos de redução do pico de vazão e do volume de escoamento.

Nesse mesmo aspecto, Paithankar e Taji (2020) verificaram o comportamento dos telhados verdes com redução total do escoamento nas fases iniciais de precipitação. No entanto, à medida que aumenta a duração da chuva, a camada de armazenamento fica saturada, evidenciando o papel da profundidade da camada de armazenamento no desempenho dos telhados verdes.

Outro fator importante para a avaliação hidrológica foi observado nos estudos de Palla e Gnecco (2015). Elas apontaram que o menor desempenho hidrológico dos cenários de baixa conversão pode ser corrigido com o emprego de outras técnicas compensatórias, de modo a tratar as demais áreas impermeáveis da microbacia. Assim, para o loteamento em estudo, nas demais parcelas impermeáveis como estacionamento, calçadas e arruamentos podem ser adicionadas pavimentos permeáveis, trincheiras, valas ou poços de infiltração, por exemplo. O que potencializaria a mitigação do escoamento de águas pluviais mesmo em cenários de conversão mais baixos como em 25% de cobertura com telhados verdes.

Todavia, dentre os cenários de modelagem numérica, torna-se importante avaliar mesmo aqueles em que os dispositivos de controle LID sejam aplicados em parcelas reduzidas da microbacia. Tal abordagem é defendida pelos pesquisadores, como afirmam Sousa et al. (2021) e Mora-Melià et al. (2018), pois a implementação dos telhados verdes em 100% da área de cobertura, sobretudo em regiões urbanas consolidadas, limita a comparação entre estudos que priorizam uma modelagem realista, tendo em vista as dificuldades enfrentadas para implantação prática dessas técnicas.

Portanto, o presente estudo satisfaz ambos os objetivos, tanto de simular o impacto dos telhados verdes na escala da microbacia em um cenário ideal de cobertura de 100%, como também em uma escala conservadora de 25%. Dessa forma, obteve-se bons resultados de mitigação do pico de escoamento superficial e do volume escoado mesmo em coberturas reduzidas, evidenciando o bom desempenho dessas técnicas compensatórias para gestão de águas pluviais urbanas.

## 5.2 VIABILIDADE ECONÔMICA DOS TELHADOS VERDES

Como o projeto do loteamento abrange apenas construções novas, cujo método construtivo em alvenaria estrutural já prevê lajes de cobertura, como suporte de telhas de fibrocimento, os telhados verdes podem ser implantados levando em consideração a cobertura total sem muitos obstáculos. No entanto, cada edificação deve ser analisada com cuidado, verificando a necessidade de reforço estrutural ou demolição, em caso de construções acabadas. Assim, é necessário a elaboração de estudo de viabilidade econômica da técnica compensatória.

Contudo, para simplificação análise, o presente estudo destacou o desembolso necessário para a construção em custos diretos, desconsiderando os custos indiretos com eventuais adicionais de reforço estrutural, manutenção e capacitação de equipe. As Figuras 24 e 25 mostram os resultados das composições orçamentárias para 1 m<sup>2</sup> de construção em telhados verdes e telhas de fibrocimento, respectivamente.

Figura 24 – Orçamento para 1 m<sup>2</sup> de telhado verde.

| Planilha Orçamentária Sintética Com Valor do Material, Mão de Obra e Equipamento |         |                                                                                                                                          |                |        |                   |               |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------|-------------------|---------------|
| Código                                                                           | Banco   | Descrição                                                                                                                                | Und            | Quant. | Valor Unit. (R\$) | Total (R\$)   |
| 103946                                                                           | SINAPI  | PLANTIO DE GRAMA ESMERALDA OU SÃO CARLOS OU CURITIBANA, EM PLACAS. AF_05/2022                                                            | m <sup>2</sup> | 1,00   | 20,06             | 20,06         |
| 102712                                                                           | SINAPI  | GEOTÊXTIL NÃO TECIDO 100% POLIÉSTER, RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DE 9 KN/M (RT - 9), INSTALADO EM DRENO - FORNECIMENTO E INSTALAÇÃO. AF_07/2021 | m <sup>2</sup> | 1,00   | 14,21             | 14,21         |
| 98546                                                                            | SINAPI  | IMPERMEABILIZAÇÃO DE SUPERFÍCIE COM MANTA ASFÁLTICA, UMA CAMADA, INCLUSIVE APLICAÇÃO DE PRIMER ASFÁLTICO, E=4MM. AF_09/2023              | m <sup>2</sup> | 1,00   | 165,89            | 165,89        |
| 7253                                                                             | SINAPI  | TERRA VEGETAL (GRANEL)                                                                                                                   | m <sup>3</sup> | 0,10   | 267,85            | 26,79         |
| C2862                                                                            | SEINFRA | LASTRO DE BRITA                                                                                                                          | m <sup>3</sup> | 0,05   | 156,09            | 7,80          |
| <b>Custo Total</b>                                                               |         |                                                                                                                                          |                |        |                   | <b>234,75</b> |

Fonte: Autor (2024).

Figura 25 – Orçamento para 1 m<sup>2</sup> de telhamento em fibrocimento.

| Planilha Orçamentária Sintética Com Valor do Material, Mão de Obra e Equipamento |        |                                                                                                                                                                                            |                |        |                   |              |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------|-------------------|--------------|
| Código                                                                           | Banco  | Descrição                                                                                                                                                                                  | Und            | Quant. | Valor Unit. (R\$) | Total (R\$)  |
| 92543                                                                            | SINAPI | TRAMA DE MADEIRA COMPOSTA POR TERÇAS PARA TELHADOS DE ATÉ 2 ÁGUAS PARA TELHA ONDULADA DE FIBROCIMENTO, METÁLICA, PLÁSTICA OU TERMOACÚSTICA, INCLUSO TRANSPORTE VERTICAL. AF_07/2019        | m <sup>2</sup> | 1,00   | 16,05             | 16,05        |
| 94231                                                                            | SINAPI | RUFO EM CHAPA DE AÇO GALVANIZADO NÚMERO 24, CORTE DE 25 CM, INCLUSO TRANSPORTE VERTICAL. AF_07/2019                                                                                        | m              | 0,30   | 51,75             | 15,53        |
| 94228                                                                            | SINAPI | CALHA EM CHAPA DE AÇO GALVANIZADO NÚMERO 24, DESENVOLVIMENTO DE 50 CM, INCLUSO TRANSPORTE VERTICAL. AF_07/2019                                                                             | m              | 0,10   | 80,96             | 8,10         |
| 94210                                                                            | SINAPI | TELHAMENTO COM TELHA ONDULADA DE FIBROCIMENTO E = 6 MM, COM RECOBRIMENTO LATERAL DE 1 1/4 DE ONDA PARA TELHADO COM INCLINAÇÃO MÁXIMA DE 10°, COM ATÉ 2 ÁGUAS, INCLUSO IÇAMENTO. AF_07/2019 | m <sup>2</sup> | 1,00   | 58,99             | 58,99        |
| <b>Custo Total</b>                                                               |        |                                                                                                                                                                                            |                |        |                   | <b>98,66</b> |

Fonte: Autor (2024).

A partir das composições e insumos, verifica-se que o valor unitário para implantação dos telhados verdes é de R\$ 234,75 por metro quadrado. Dessa forma, considerando a conversão de toda a área de telhados do loteamento o custo de implantação seria de R\$ 5.101.501,81.

Por outro lado, de acordo o projeto original para telhas em fibrocimento sobre trama de madeira apoiada na laje de cobertura, o valor unitário chega a R\$ 98,66 por metro quadrado. Assim, para a área total de telhados, seriam necessários R\$ 2.144.110,72 para construção. Portanto, o valor dos telhados verdes supera mais que o dobro o valor inicial previsto para cobertura das edificações do loteamento.

Tal resultado está de acordo com os valores obtidos por estudos como Borges et al. (2022), cujo desembolso para os telhados verdes superam o dobro do custo de coberturas em telhas cerâmicas, PVC, fibras vegetais (ecológica) e fibrocimento na cidade de Teresina, Piauí. Contudo, é necessário considerar que as composições utilizadas diferem substancialmente além da fonte de dados, pois os autores não conseguiram encontrar valores para os telhados verdes no mercado local.

Nessa perspectiva, os resultados obtidos são diferentes e difíceis de comparar com os estudos já realizados. Herkle et al. (2023) afirma que diferentes abordagens e suposições de custo e benefício para o cálculo orçamentário dos telhados verdes, dificultando a tomada de decisão.

Nesse contexto, Manso et al. (2021), constataram a imprevisibilidade da maioria dos custos e benefícios associados aos telhados verdes, na medida em que estão sujeitos a muitos fatores diferentes. Tais estruturas costumam ter longa duração e, por conseguinte, podem mostrar uma economia consideravelmente alta a longo de sua vida útil, superando gastos de manutenção, razão pela qual valem a pena investir.

Além disso, Santos et al. (2024) destacaram a necessidade de se considerar materiais e plantas adequados e gerenciar a irrigação de forma eficiente, visando baratear o uso dos telhados verdes. Um exemplo disso seria recorrer a fontes alternativas de água, como a reciclagem de águas residuais das edificações.

Logo, levando em conta os benefícios dos dispositivos, mesmo que sirvam apenas para melhorar o apelo visual do ambiente circundante, partes interessadas com maior poder aquisitivo já adotam esse sistema. Porém, vários fatores, incluindo a falta de políticas governamentais, clima, nível de tecnologia insatisfatório, características da vegetação, propriedades do solo, custo de construção, legislação, cultura e educação representam barreiras que podem dissuadir parte da população

na adoção desses sistemas (Santos et al., 2024).

Dessa forma, sobretudo em locais menos desenvolvidos que enfrentam maiores desigualdades, torna-se necessário a intervenção de políticas públicas de desenvolvimento urbano que abordem tais obstáculos. Assim, Liberalesso et al. (2020) sugere que a construção de telhados e outras estruturas verdes pode ser incentivada através de reduções fiscais, financiamento e certificação de sustentabilidade.

Muitas cidades já adotam esse tipo de política pública, como aponta Canholi (2005), em que as regulamentações e subsídios estão bem estabelecidos. Para o presente estudo, entretanto, não foram observados tais incentivos de modo a baratear o custo de implantação dos telhados verdes.

Apesar disso, verificou-se que, em articulação com as diretrizes da Agenda 2030, o município de Teresina aprovou, em dezembro de 2019, o Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT). O documento aponta, como uma de suas estratégias para promoção da sustentabilidade, o uso de telhados verdes nas edificações construídas em zonas urbanizadas como forma de atrair investimentos dos setores da sociedade, dando benefícios fiscais aos proprietários que adotem esses dispositivos (Teresina, 2019). Ainda assim, a área de abrangência para tais incentivos é limitada, havendo a necessidade de ampliação para zonas menos estruturadas da cidade.

Portanto, observa-se que os telhados verdes são dispositivos de controle LID estratégicos para avanço de ambientes urbanos mais sustentáveis e resilientes, dado o seu alto desempenho no gerenciando de águas pluviais urbanas, mitigação de ilhas de calor, promoção da biodiversidade e até mesmo do valor estético e recreativo das edificações, sendo um diferencial em empreendimentos privados. Por outro lado, ao analisar estritamente os valores envolvidos no custo direto para construção, a viabilidade econômica de sua implementação está sujeita a adoção de maiores incentivos públicos para esse mercado.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da modelagem hidrológica no SWMM, o presente trabalho analisou o impacto hidrológico, sob diferentes intensidades de precipitação, da implementação de telhados verdes em um loteamento residencial de Teresina, Piauí. Baseado nessa metodologia, constatou-se que o aumento do TR nos eventos de chuva não ocasionou mudanças significativas no comportamento dos dispositivos LID, ao passo que a parcela de área impermeável e a duração da precipitação influencia diretamente nos resultados do escoamento superficial.

Dessa forma, considerando um cenário de cobertura total da área de telhados pela técnica compensatória, foram verificadas reduções no pico de vazão e no volume superficial escoado de até 35,94% e 31,40%, respectivamente. Enquanto que, no cenário de intervenção de apenas 25% da área de telhados, o amortecimento foi de 8,39% e 7,78%, em ordem de pico de vazão e do volume escoado. Sob o aspecto hidrológico, portanto, esses dispositivos têm um bom desempenho para a gestão de águas pluviais urbanas e seu uso deve ser cada vez mais incentivado.

Entretanto, ao se comparar os custos diretos de construção com a cobertura em telhas de fibrocimento, originalmente propostas pelo projeto, para a implementação dos telhados verdes no mercado regional, ainda é necessário um alto investimento. Visto que, utilizando as composições de serviço e insumos do SINAPI/PI e Seinfra/CE, obteve-se o custo de R\$ 234,75/m<sup>2</sup> de telhado verde, representando mais que o dobro do custo envolvido na cobertura tradicional, com R\$ 98,66/m<sup>2</sup>.

Apesar disso, as características dos telhados verdes abrangem não somente os aspectos hidrológicos, com o amortecimento do escoamento superficial, mitigação dos riscos de alagamento e sobrecarga dos sistemas de drenagem. Esses dispositivos apresentam também vantagens como a redução dos efeitos de ilha de calor urbanas, devido suas camadas isolantes, além da promoção da biodiversidade e até mesmo do valor estético e recreativo das edificações, sendo um diferencial em empreendimentos privados. Logo, o uso dessas técnicas compensatórias é estratégico para o desenvolvimento de ambientes urbanos mais sustentáveis e resilientes.

Nessa perspectiva, torna-se imprescindível a redução dos valores de investimento inicial de implantação, custeados pela iniciativa privada, para que os telhados verdes tenham uma melhor viabilidade econômica. Isso por meio do aumento

de incentivos fiscais, regulamentação de benefícios, certificações e abono em impostos e taxas por parte do poder público, sobretudo em regiões de grande vulnerabilidade social, econômica e ambiental, como é o caso da cidade de Teresina.

Sob tais aspectos, os objetivos do presente trabalho foram alcançados, na medida em que se obtiveram resultados satisfatórios tanto para o estudo do impacto hidrológico dos telhados verdes na bacia do loteamento, como para a discussão acerca da viabilidade econômica de sua implantação. Assim, este estudo contribui cientificamente para o desenvolvimento sustentável da cidade de Teresina, Piauí, reunindo análises quantitativas do impacto causado pela implantação dos telhados verdes na escala regional, através de metodologias fundamentadas acerca do aspecto hidrológico e econômico.

Ainda assim, é recomendado a realização de pesquisas futuras em escala regional, abordando outras variáveis que influenciam no desempenho hidrológico dos telhados verdes como a evapotranspiração em diferentes espécies de vegetação, bem como o substrato necessário para cultivar essas plantas nos regimes de estiagem de Teresina. Além disso, outras durações de chuva podem ser simuladas no comportamento de mais bacias, sobretudo aquelas já urbanizadas, comparando os hietogramas com os índices pluviométricos reais a partir de protótipos de telhados. Para mais, os loteamentos podem ser dimensionados como bacias para implementação de controles LID diversificados, a fim de obter-se mais cobertura de tratamento, verificando o impacto econômico no dimensionamento e implementação de dispositivos de drenagem estruturais na micro e, sobretudo, na macrodrenagem.



## REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems**. Water Environment Federation, American Society of Civil Engineers – ASCE, Reston, Virginia, USA, 1992. <https://doi.org/10.1061/9780872628557>
- BARBOSA, I. S. S.; DE SÁ, G. S.; SANTOS, L. P. R.; FREIRE, A. S.; & SOUSA, M. C. B. **Avaliação do uso de telhados verdes através de modelagem computacional na sub-bacia P13 em Teresina-PI**. In: SIMPÓSIO SOBRE SISTEMAS SUSTENTÁVEIS, 7., Porto Alegre, 2023. Anais [...]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2023, p. 647-653.
- BORGES, L. R. L.; MACEDO, F. R. C.; SOUSA, R. R. M.; & COSTA, T. H. C. **Telhados verdes e telhas ecologicamente sustentáveis: análise comparativa de benefícios e custos em comparação com telhados convencionais**. Revista de Engenharia e Tecnologia, V. 14, nº 4, p. 81-92, 2022.
- BRENES, J. R. B.; VEGA, R. O.; & HACK, J. **A Width Parameter Estimation Through Equivalent Rectangle Methodology for Hydraulic Modeling Applications**. Journal of water management modeling - JWMM, V. 30, C493, 2022. <https://doi.org/10.14796/JWMM.C493>
- CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. Oficina de Textos 2. Ed., São Paulo, 2005.
- CHRISTOFIDIS, D.; ASSUMPÇÃO, R. S. F. V.; & KLIGERMAN, D. C. **A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza**. Saúde Debate – V. 43, nº Especial 3, p. 94-108. Rio de Janeiro, 2019. <https://doi.org/10.1590/0103-11042019S307>
- HEKRLE, M.; LIBERALESSO, T.; MACHÁČ, J.; & SILVA, C. M. **The economic value of green roofs: A case study using different cost–benefit analysis approaches**. Journal of Cleaner Production, V. 413, e137531, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137531>
- KÖHLER, M.; SCHMIDT, M.; GRIMME, F.W.; LAAR, M.; & GUSMÃO, F. **Water retention by greened roofs in temperate and tropical climate**. 38th IFLA World Congress, Anais., Singapore, 2001.
- LIBERALESSO, T.; CRUZ, C. O.; SILVA, C. M.; & MANSO, M. **Green infrastructure and public policies: an international review of green roofs and green walls incentives**. Land Use Policy, V. 96, e104693, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104693>.
- LIBERALESSO, T.; SILVA, C. M.; & CRUZ, C. O. **Combined strategies for green roof incentive policies in Lisbon: evaluating the potentiality of concession grants and identifying priority intervention areas**. Urban Forestry & Urban Greening, V. 99, e128451, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128451>

- LIMA, S. M. S. A.; LOPES, W. G. R.; & FAÇANHA, A. C. **Desafios do planejamento urbano na expansão das cidades: entre planos e realidade**. Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, 11, e20190037, 2019. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.e20180037>
- MANSO, M.; TEOTÓNIO, I.; SILVA, C. M.; & CRUZ, C. O. **Green roof and green wall benefits and costs: a review of the quantitative evidence**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, V. 135, e110111, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110111>.
- MARTINS, L. G. B. **Avaliação do potencial de aplicação de técnicas compensatórias em áreas urbanas consolidadas**. 197f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.
- MATTOS, C. S. **Desempenho térmico de um telhado verde inserido em região semiárida**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Caruaru, 2015.
- MCCUEN, R.H. **Hydrologic Analysis and Design**. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.
- MORA-MELIÀ, D.; LÓPEZ-ABURTO, C. S.; BALLESTEROS-PÉREZ, P.; MUÑOZ-VELASCO, P. **Viability of green roofs as a flood mitigation element in the central region of Chile**. Sustainability, V. 10, nº 4: 1130, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10041130>
- PAITHANKAR, D. N.; & TAJI, S. G. **Investigating the hydrological performance of green roofs using storm water management model**. Materials Today: Proceedings, V. 32, Part 4, p. 943-950, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.085>
- PALLA, A.; & GNECCO, I. **Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale**. Journal of Hydrology, V. 528, p. 361–368, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.050>
- PALLA, A.; GNECCO, I.; & LA BARBERA, P. **The impact of domestic rainwater harvesting systems in storm water runoff mitigation at the urban block scale**. J Environ Manage, V. 191, p. 297-305, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.025>
- PEDRSOSA, R. A. **Urbanização de baixo impacto: alternativa à drenagem urbana de Teresina, Pi**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal do Piauí, Campus Teresina Central, Teresina, 2021.
- POMPÊO, C. A. **Drenagem urbana sustentável**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, V. 5, nº 1, p 15-23, 2000. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v5n1.p15-23>
- ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1**. US EPA National Risk Management Research Laboratory. Cincinnati, Ohio, USA,

2015.

SANTOS, T. D. DE O.; PACHECO, F. A. L.; & FERNANDES, L. F. S. **A systematic analysis on the efficiency and sustainability of green facades and roofs.**

Science of the Total Environment, nº 932, e173107, 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173107>

SOIL CONSERVATION SERVICE. **Urban Hydrology for Small Watersheds.**

Technical Release, nº 55, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 1986.

SOUSA, M. C. B.; PEDRSOSA, R. A.; IWATA, B. F.; & CHAVES, S. V. V. **Uso de telhados verdes para controle de águas pluviais urbanas em Teresina – Piauí.**

Revista de Geografia (Recife) V. 38, nº 2, 2021. <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2021.246116>

TERESINA. **Lei Complementar nº 6.105, de 07 de junho de 2024.** Altera dispositivos da Lei Complementar nº 4.724/2015, que define as diretrizes para regulação relativa a controle dos impactos da drenagem urbana de novos empreendimentos e inundações ribeirinhas, na drenagem pluvial pública, e dá outras providências - e suas modificações posteriores; institui o Fundo Municipal de Drenagem Urbana, e dá outras providências. Câmara Municipal, Teresina, Piauí, 2024.

TERESINA. **Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina.** Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação Geral, Teresina, Piauí, 2010.

TERESINA. **Plano Diretor de Ordenamento Territorial de Teresina.** Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação Geral, Teresina, Piauí, 2019.

TERESINA. **Plano Diretor de Urbana de Teresina: Manual de Drenagem.** Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação Geral, Teresina, Piauí, 2011.

TUCCI, C. E. M. **Água no meio urbano. In.: Água Doce.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Drenagem urbana.** Cienc. Cult, V. 55, nº 4, 2003.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas.** Ministério das Cidades. Global Water Partnership. Wolrd Bank. Unesco, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** Editora da UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 1993.

VERSINI, P.A.; RAMIER, D.; BERTHIER, E.; & DE GOUVELLO, B. **Assessment of the hydrological impacts of green roof: from roof scale to basin scale.** Journal of Hydrology, V. 524, p. 562–575, 2015.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.020>