



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E PLANEJAMENTO
ESPACIAL**

DANIELLA RODRIGUES TAVARES

**DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL PARA GESTÃO DO RISCO
HIDROLÓGICO EM TERESINA, PIAUÍ.**

TERESINA-PI

2024

DANIELLA RODRIGUES TAVARES

**DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL PARA GESTÃO DO RISCO
HIDROLÓGICO EM TERESINA, PIAUÍ.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Análise e Planejamento Espacial do Instituto Federal do Piauí - IFPI, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Análise e Planejamento Espacial. Área de concentração: Análise Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Mauro César de Brito Sousa

TERESINA-PI

2024

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

Tavares, Daniella Rodrigues

T231d Drenagem urbana sustentável para gestão do risco hidrológico em
Teresina, Piauí / Daniella Rodrigues Tavares. - 2024.
85 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado Profissional em Análise e Planejamento Espacial) -
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central, 2024.

Orientador : Prof Dr. Mauro César de Brito Sousa .

1. Gestos de riscos. 2. Desenvolvimento de baixo impacto. 3.
Sustentabilidade. I. Título.

CDD - 910

Elaborado por Maria Rosismar Farias CRB 3/631

DANIELLA RODRIGUES TAVARES

DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL PARA GESTÃO DO RISCO
HIDROLÓGICO EM TERESINA, PIAUÍ.

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Análise e
Planejamento Espacial do Instituto Federal
do Piauí - IFPI, como parte integrante dos
requisitos para a obtenção do título de
Mestre em Análise e Planejamento Espacial.

Aprovada em: 09/09/2024.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof Dr. Reurysson Chagas de Sousa Moraes
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof Dra. Renata Shirley de Andrade Araújo
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

À Deus, Robersino (in memorian),
Maricildes, Emanuella, Andressa,
Dominic e a todos os afetados pelos
desastres naturais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me concedido força, sabedoria e resiliência ao longo desta jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Mauro César, pela paciência e suporte indispensáveis para a concretização deste trabalho.

Aos professores das disciplinas ministradas durante o curso, pelos ensinamentos e experiências repassadas

Ao meu pai, Robersino Tavares, que, mesmo após sua partida, continua a ser meu maior fã e incentivador. Sua memória e ensinamentos foram guias constantes nesta trajetória.

À minha mãe, Maricildes Rodrigues, uma mulher extraordinariamente forte, que me aconselhou e ajudou imensamente, especialmente nos momentos em que as rotinas diárias pareciam insustentáveis. Sua dedicação e amor foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Às minhas irmãs, Emanuella e Andressa, que, mesmo de longe, foram fontes de apoio, acolhimento e carinho nos momentos mais difíceis.

Ao meu sobrinho Dominic, que, com sua doçura infantil e energia contagiante, trouxe luz e ânimo nos momentos mais avassaladores.

Aos meus fiéis companheiros de quatro patas, Aurora, Juca, Cosme e Damião, por suas doses diárias de fidelidade carinho e diversão que tornaram os dias mais leves.

Aos meus amigos, pela ausência nos momentos não vividos, compreendendo minha dedicação e me incentivando sempre.

Aos amigos de curso pelos bons momentos compartilhados.

A oração   a purificação da alma.

Robersino Tavares da Rocha

RESUMO

O crescimento desordenado das cidades e a consequente impermeabilização do solo intensificaram os problemas relacionados à drenagem urbana, resultando em enchentes, inundações, alagamentos e outros desastres associados ao risco hidrológico. O processo de urbanização da capital piauiense, à luz de aparelhar o espaço urbano para a expansão da mesma através de aterros, tamponamentos, retificações de seus cursos d'água, nos períodos de chuva, tem provocado à cidade de Teresina, vários problemas socioambientais que se acentuam progressivamente. Frente o reconhecimento da relevância do planejamento ambiental, este trabalho objetiva analisar a implementação de estratégias de drenagem urbana sustentável como uma solução eficaz para a mitigação de riscos hidrológicos, e assim, fortalecer as políticas de resiliência propondo ações para superar os riscos e vulnerabilidades no enfrentamento à eventos hidrológicos futuros. A pesquisa utilizou a modelagem hidrológica através do *software Storm Water Management Model (SWMM)* para analisar o comportamento da sub-bacia PD12 localizada na zona leste da cidade de Teresina, estado do Piauí, e o consequente impacto da aplicação de telhados verdes e microrreservatórios através de sete cenários com as implementações de 25%, 50% e 100% dos mesmos em tempos de retorno de 5 anos e 10 anos. A comparação dos resultados da modelagem antes e após a implementação das LIDs, mostraram diminuição do pico de vazão de até 8% para implantação de telhados verdes e de até 3% para implantação de microrreservatórios. O estudo também destaca a importância de políticas públicas e incentivos para promover a adoção em larga escala de soluções de baixo impacto como parte integrante do planejamento urbano. Um guia de boas práticas em drenagem urbana sustentável, aplicado à gestão de risco de desastres hidrológicos na capital piauiense é apresentado, com o intuito de fomentar uma mudança cultural entre os moradores e gestores públicos, promovendo uma visão mais integrada e sustentável da gestão dos riscos hidrológicos. Esse estudo em Teresina, ao integrar telhados verdes e microrreservatórios em sua infraestrutura, demonstra que é possível alcançar resultados positivos na mitigação dos riscos de inundações e alagamentos, ao mesmo tempo em que promove a sustentabilidade ambiental e o bem-estar da comunidade. Este trabalho, portanto, contribui para o conhecimento e a prática da

engenharia urbana sustentável, oferecendo técnicas que podem ser adaptadas e replicadas em outras cidades que enfrentam desafios semelhantes.

Palavras-chave: gestão de riscos; desenvolvimento de baixo impacto; sustentabilidade.

ABSTRACT

The unregulated growth of cities and the resulting soil impermeabilization have intensified issues related to urban drainage, leading to floods, inundations, waterlogging, and other disasters associated with hydrological risk. The urbanization process of Piauí's capital city, in an effort to prepare the urban space for expansion through landfills, channelizations, and straightening of watercourses, has progressively exacerbated various socio-environmental issues in the city of Teresina during rainy seasons. Recognizing the importance of environmental planning, this study aims to analyze the implementation of sustainable urban drainage strategies as an effective solution for mitigating hydrological risks, thereby strengthening resilience policies and proposing actions to address the risks and vulnerabilities associated with future hydrological events. The research employed hydrological modeling using the Storm Water Management Model (SWMM) software to analyze the behavior of the PD12 sub-basin, located in the eastern zone of Teresina, in the state of Piauí, and the resulting impact of implementing green roofs and micro-reservoirs through seven scenarios, with 25%, 50%, and 100% applications of these structures under return periods of 5 and 10 years. Comparison of modeling results before and after implementing these LIDs showed a peak flow reduction of up to 8% with green roofs and up to 3% with micro-reservoirs. The study also highlights the importance of public policies and incentives to promote large-scale adoption of low-impact solutions as an integral part of urban planning. A best practices guide for sustainable urban drainage is presented, aimed at hydrological disaster risk management in the Piauí capital, with the objective of fostering a cultural shift among residents and public managers, promoting a more integrated and sustainable approach to managing hydrological risks. This study in Teresina, by integrating green roofs and micro-reservoirs into its infrastructure, demonstrates that it is possible to achieve positive results in flood and waterlogging risk mitigation, while also promoting environmental sustainability and community well-being. Therefore, this work contributes to the knowledge and practice of sustainable urban engineering, providing techniques that can be adapted and replicated in other cities facing similar challenges.

Keywords: risk management; low impact development; sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Ciclo de gestão de risco e gerenciamento de desastre e proteção em defesa civil.....	32
Figura 2 – Organograma do ciclo de gestão de riscos	33
Figura 3 – Camadas do telhado verde.....	43
Figura 4 - Pavimento permeável (tipo intertravado)	45
Figura 5 - Corte esquemático de jardim de chuva.....	46
Figura 6 - Corte esquemático de trincheira de infiltração	47
Figura 7 – Croqui de microrreservatório enterrado.....	49
Figura 8 – Localização da sub-bacia PD-12	54
Figura 9 – Inundação da Avenida Cajuína, Noivos.....	55
Figura 10 – Alagamento na Avenida Pedro Almeida, São Cristóvão	55
Figura 11 – Hidrograma no cenário diagnóstico	61
Figura 12 – Hidrogramas de desempenho dos Telhados Verdes TR = 5 anos	63
Figura 13 - Hidrogramas de desempenho dos Telhados Verdes TR = 10 anos	64
Figura 14 - Hidrogramas de desempenho dos Microrreservatórios TR = 5 anos ..	68
Figura 15 - Hidrogramas de desempenho dos Microrreservatórios TR = 10 anos	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resultados das simulações para o Telhado Verde TR=5 anos	63
Quadro 2 – Resultados das simulações para o Telhado Verde TR=10 anos	63
Quadro 3 – Resultados das simulações para o microrreservatório TR=5 anos	69
Quadro 4 - Resultados das simulações para o microrreservatório TR=10 anos ...	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	PRESSUPOSTOS TEÓRICOS	18
2.1.	RISCOS HIDROLÓGICOS.....	18
2.2.	VULNERABILIDADE.....	21
2.3.	EXPOSIÇÃO	22
2.4.	RESILIÊNCIA	22
2.5.	SUSCEPTIBILIDADE.....	23
2.6.	DESASTRES.....	24
2.7.	AÇÕES DE MITIGAÇÃO.....	27
2.7.1.	Histórico	27
2.7.2.	Competências	31
2.8.	DRENAGEM TRADICIONAL X DRENAGEM SUSTENTÁVEL.....	36
2.9.	TÉCNICAS (LID)	38
2.9.1.	Medidas compensatórias não estruturais.....	41
2.9.2.	Medidas compensatórias estruturais.....	42
2.9.2.1.	Telhado verde.....	42
2.9.2.2.	Pavimentos permeáveis.....	45
2.9.2.3.	Jardins de Chuva.....	46
2.9.2.4.	Trincheiras de infiltração	47
2.9.2.5.	Valas de infiltração	48
2.9.2.6.	Microrreservatórios.....	48
2.10.	MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	49
2.10.1.	SWMM	50
3	ÁREA DE ESTUDO	54
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	57

4.1.	CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO	58
4.2.	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DAS LIDS	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
5.1.	CENÁRIO 1: DIAGNÓSTICO	61
5.2.	CENÁRIO 2: 100 % DE TELHADOS VERDES	62
5.3.	CENÁRIO 3: 50 % DE TELHADOS VERDES	62
5.4.	CENÁRIO 4: 25 % DE TELHADOS VERDES	62
5.5.	CENÁRIO 5: 100% DE MICRORRESERVATÓRIOS	66
5.6.	CENÁRIO 6: 50% DE MICRORRESERVATÓRIOS.....	67
5.7.	CENÁRIO 7: 25% DE MICRORRESERVATÓRIOS	67
6	CONCLUSÃO	73
	REFERÊNCIAS	76
	APÊNDICE A: ÁREA DE TELHADOS DA SUB-BACIA PD12 DE TERESINA - PI.....	84
	APÊNDICE B: QUANTIDADE DE LOTES DA SUB-BACIA PD12 DE TERESINA - PI.....	85

1 INTRODUÇÃO

A drenagem urbana nas grandes cidades, durante muitos anos, foi tratada como um aspecto acessório no parcelamento do solo, sem levar em conta as condições naturais do ambiente. Em várias metrópoles, o crescimento urbano acelerado desconsiderou os impactos na drenagem, e poucas delas reconheceram essa questão como fundamental no planejamento (Canholi, 2014; Tavanti & Barbassa, 2009).

As áreas urbanas, cada vez maiores e mais impermeáveis, ocorreram a partir das zonas mais baixas próximas aos corpos hídricos em face das necessidades básicas da população (alimentação, higiene, transporte). Com a modernização essas regiões incorporaram o sistema viário sobre meandros, fazendo com que córregos fossem retificados e canalizados a céu aberto ou até mesmo bloqueados.

Tais alterações resultaram em ações prejudiciais ao ambiente e ao próprio homem, pois reduzem a capacidade de infiltração do solo e aceleram a velocidade do escoamento superficial, alterando significativamente o ciclo hidrológico e gerando desastres ocasionados por inundações atrelados a outros fatores sociais.

A prática tradicional em projetos de drenagem urbana para evitar os alagamentos dentro da cidade tem sido a de soluções localizadas, buscando a rápida evacuação das águas para longe dos centros de geração do escoamento. Essa prática mostra-se insuficiente além de apresentar altos custos. O projeto de drenagem é realizado, na maioria das vezes, procurando resolver um problema de uma área específica, não identificando os impactos que essa solução pode gerar nas regiões a jusante (TERESINA, 2012).

Muitas vezes, uma alternativa é aparentemente razoável quando pensada e planejada isoladamente, mas torna-se inviável ou ineficiente quando toda a bacia é considerada. As soluções localizadas resolvem o problema da cheia em uma área, mas o transferem para jusante, exigindo, assim, o redimensionamento da rede de drenagem de jusante e resultando em custos cada vez mais elevados devido às dimensões das novas estruturas, além dos desastres ocasionados pelas inundações (TERESINA, 2012).

Recentes catástrofes provocadas por eventos hidrológicos em vários estados da Federação revelaram a fragilidade das atuais políticas públicas para o tratamento do problema das inundações. Os eventos extremos ocorridos nos últimos cinco

anos no Brasil geraram recordes de impactos desastrosos sobre a população, desabrigando milhares, levando a óbito centenas delas e mobilizando diversos segmentos sociais, acadêmicos e dos governos.

Um dos principais desafios encontrados na gestão de riscos e desastres está no fato de que a velocidade e a imprevisibilidade dos desastres naturais exigem medidas de monitoramento superiores à capacidade da gestão pública, que muitas vezes possui equipe técnica e recursos tecnológicos insuficientes.

Apesar de ser a primeira capital planejada, Teresina no estado do Piauí, sofre todos os anos com constantes casos de alagamentos de suas vias durante o período chuvoso, que acontece com mais intensidade nos meses de dezembro a maio.

Estrategicamente localizada na confluência dos rios Parnaíba e Poti, que atravessam a cidade e dividem suas zonas urbanas, a cidade é comumente segmentada em quatro regiões principais: Centro-Norte, Leste, Sudeste e Sul. Devido à existência de depressões naturais nas áreas marginais dos dois rios, durante o período chuvoso formam-se inúmeras lagoas que, às vezes, se estendem por diversos bairros.

Essa soma de fatores eleva uma série de transtornos para a população teresinense que sofre com o acúmulo das águas pluviais, prejudicando o tráfego nas principais vias da cidade. Isso se deve a expansão urbana desordenada atrelada ao insuficiente sistema de drenagem.

Da mesma forma, a rapidez da expansão urbana, principalmente em áreas de ocupação espontânea, ocorre de modo que os elementos relativos à vulnerabilidade devem ser atualizados em curtos períodos de tempo. Frente à esta problemática global, diversos estudos têm sido amplamente aplicados no sentido de mitigar os deflúvios urbanos, denominadas Soluções de Desenvolvimento de Baixo Impacto ou LID (Low Impact Development) (Kourtis *et al.*, 2018).

Recentes aplicações na gestão de riscos e desastres têm demonstrado eficiência como uma importante ferramenta de apoio. Autores como Miguez e Veról (2014) destacam a eficácia de infraestruturas verdes, como parques lineares, telhados verdes e jardins de chuva, no aumento da infiltração da água no solo e na redução do escoamento superficial em cidades, contribuindo para a resiliência urbana frente a eventos extremos.

Além disso, Barbosa et al. (2012) também abordam a importância dos reservatórios urbanos e cisternas, que permitem o armazenamento e uso eficiente da água da chuva, aliviando a carga sobre os sistemas de drenagem urbana e reduzindo os riscos de enchentes.

O gerenciamento de drenagem nas cidades brasileiras é, de maneira em geral, realizado pelas prefeituras municipais através dos planos diretores de drenagem urbana, que tentam traduzir esses conceitos compensatórios buscando sua implementação.

Outra medida compensatória é a requalificação de corpos d'água urbanos, como rios e córregos, que muitas vezes são canalizados e poluídos. A revitalização desses ambientes pode incluir a renaturalização de margens e a recuperação de mata ciliar, o que não só melhora a qualidade da água, mas também proporciona benefícios ecológicos e estéticos (Silva-Sánchez e Jacobi, 2012).

A promoção de políticas de uso do solo que incentivem a manutenção de áreas permeáveis é igualmente importante, garantindo que novas construções e empreendimentos contemplem espaços para infiltração de água e reduzam a impermeabilização excessiva do solo, o que, por sua vez, ajuda a minimizar o risco de inundações e a proteger os ecossistemas locais (Beyruth, 2006; Oliveira, 2011).

Para que essas medidas sejam eficazes, é essencial que políticas públicas sejam desenvolvidas e implementadas com uma visão integrada de gestão dos recursos hídricos. Isso inclui a criação de marcos regulatórios que incentivem práticas sustentáveis, a alocação de recursos para projetos de infraestrutura verde e a conscientização da população sobre a importância da gestão adequada da água.

No entanto, ainda é necessário compreender esses processos naturais para fazer frente a esta tendência cíclica hidrológica que vem se agravando em período recente. Tecnicamente há o desafio que envolve discutir, organizar e oferecer ferramentas para contribuir para um processo integrado de gestão de riscos nessas cidades.

A demanda por políticas orientadas ao risco, em lugar da tradicional abordagem orientada a evento, torna-se evidente e demonstram a necessidade de aprofundamento sobre o tema. Assim, esse estudo propõe a implementação de técnicas sustentáveis de drenagem urbana na sub-bacia PD12, na cidade de Teresina, Piauí, para propor um Manual Técnico de Boas Práticas em Drenagem

Sustentável aplicado à Gestão de Risco de Desastres Hidrológicos na capital, visando contribuir para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de novas aplicações.

Assim, esta pesquisa justifica-se pela importância de conhecer e compreender a resposta que tais ferramentas podem acarretar na bacia hidrográfica, frente a determinados eventos chuvosos, além de fornecer informações que melhorem a gestão dos riscos na cidade. Quanto aos objetivos da pesquisa, têm-se como objetivo geral, avaliar estratégias de drenagem urbana sustentável como forma de mitigar o risco hidrológico em bacias urbanas. Por objetivos específicos:

- Modelar a bacia hidrográfica PD12, localizada em Teresina - PI, considerando cenários com e sem a implementação de estratégias de drenagem urbana sustentável;
- Realizar um estudo comparativo dos hidrogramas dos cenários modelados para avaliar o efeito das LIDs (Low Impact Development) implementadas;
- Desenvolver um guia de boas práticas que aborde os riscos hidrológicos, as estratégias de drenagem urbana sustentável, e os resultados obtidos no estudo.

Através desses resultados é possível atuar sobre a prevenção de danos e as componentes do risco com adaptação para melhorar as respostas futuras do sistema, minimizando inundações e alagamentos, atuando para a redução das vulnerabilidades da cidade.

2 PRESSUPOSTOS TEÓRICOS

2.1. RISCOS HIDROLÓGICOS

Os riscos hidrológicos, como inundações e secas, representam ameaças significativas para a sociedade, especialmente em um contexto de mudanças climáticas e urbanização crescente. Estes eventos têm o potencial de causar impactos devastadores em termos de perda de vidas, danos à infraestrutura e impactos econômicos. A gestão desses riscos é um campo de estudo amplamente abordado, que oferece perspectivas variadas sobre como mitigar e responder a tais desafios.

A definição de risco vem ganhando espaço e apresenta nuances com margem para diversas interpretações de áreas de conhecimento de órgãos distintos. Só o Glossário da Defesa Civil (BRASIL, 2009) aponta cinco conceitos:

1. Medida de dano potencial ou prejuízo econômico expressa em termos de probabilidade estatística de ocorrência e de intensidade ou grandeza das consequências previsíveis.
2. Probabilidade de ocorrência de um acidente ou evento adverso, relacionado com a intensidade dos danos ou perdas, resultantes dos mesmos.
3. Probabilidade de danos potenciais dentro de um período especificado de tempo e/ou de ciclos operacionais.
4. Fatores estabelecidos, mediante estudos sistematizados, que envolvem uma probabilidade significativa de ocorrência de um acidente ou desastre.
5. Relação existente entre a probabilidade de que uma ameaça de evento adverso ou acidente determinado se concretize e o grau de vulnerabilidade do sistema receptor a seus efeitos.

Em todos os conceitos de risco, a Defesa Civil se utiliza da palavra probabilidade com o intuito de expor uma ocorrência de um dano consequente. Nota-se que na terceira definição, o dano ocorre ao longo de um processo ou de ciclos operacionais, conhecido como período de retorno, se referindo à frequência com que um determinado evento de incidente (ou seja, uma chuva de intensidade específica) é esperado que ocorra em uma localidade ao longo do tempo.

A quarta definição associa a probabilidade de acidente ou desastre mediante estudos prévios e sistematizados, que podem avaliar o risco antecipadamente orientando gestão de controle. A vulnerabilidade é citada na quinta definição como característica de recepção que analisa o grau dos efeitos negativos.

O perigo no contexto dos riscos hidrológicos, está diretamente relacionado com as inundações e os alagamentos, decorrentes da parcela superficial de

escoamentos do ciclo hidrológico, um processo deflagrado por um agente natural (chuva) que não pode ser controlado. No entanto, não se pode afirmar que a chuva, por si só, seja um evento perigoso, pois ela é essencial para diferentes sistemas naturais e sua ausência pode gerar diversos problemas ambientais e sociais (Miguez et. al, 2018).

A forma como a chuva é recebida pela bacia e transformada em vazão é que pode representar uma fonte de perigo. Isso porque a ação humana sobre uma determinada bacia é fator determinante, haja vista que quanto mais urbanizada for, maior a suscetibilidade de produzir escoamento superficial, diferente daquela produzida por uma bacia natural (Miguez et. al, 2018).

Para Anschau et al. (2018), essa progressiva impermeabilização do solo nas zonas urbanas favorece o aumento e a velocidade de escoamento superficial, diminui o tempo de concentração e eleva a vazão de pico, ocasionando alagamentos e agravando as enchentes e inundações, que trazem inúmeros impactos negativos financeiros, sociais e sobretudo ambientais.

Segundo Cardoso (2014), além da intervenção direta do processo de urbanização no ciclo hidrológico, que inclui a impermeabilização de grande parte da superfície e as mudanças climáticas, existem fatores hidrológicos influenciados por decisões políticas que afetam diretamente a origem dos processos de inundação, agravando o ciclo hidrológico.

Planejamento urbano deficiente, falta de investimento em infraestrutura, gestão ineficiente dos recursos hídricos, baixa participação comunitária, falta de inclusão social, corrupção e má governança são fatores políticos que desempenham um papel crucial na amplificação dos riscos hidrológicos.

A eficácia das políticas públicas na mitigação desses riscos depende da capacidade dos governantes de adotar uma abordagem integrada, sustentável e inclusiva, considerando as necessidades e vulnerabilidades das diferentes comunidades e ecossistemas. A implementação de políticas coerentes, transparentes e externas para o longo prazo é essencial para reduzir a exposição e a vulnerabilidade das situações aos desastres hidrológicos.

Em conformidade com o tema, Di Baldassarre et al. (2018) defendem a necessidade de políticas de planejamento urbano que incorporem princípios de sustentabilidade e resiliência, como a criação de infraestruturas verdes e a manutenção de zonas de inundação naturais.

Canholi (2015) afirma que a crescente urbanização impõe desafios significativos à gestão de drenagem, exigindo estratégias inovadoras que equilibrem o desenvolvimento urbano com a preservação dos ecossistemas naturais. Ele afirma ainda, que a integração de práticas sustentáveis na gestão da drenagem urbana é fundamental para a preservação do meio ambiente, contribuindo para a redução da poluição hídrica e promovendo o uso eficiente dos recursos hídricos.

A ausência de um sistema de saneamento efetivo, falhas no manejo esgotos e resíduos sólidos aumentam a vulnerabilidade da população nos eventos de cheias urbanas, em função da maior possibilidade de doenças de veiculação hídrica. A falta de fiscalização e ordenamento do uso do solo é outro fator agravante, já que facilitam a busca por moradias em áreas de risco, faixas marginais aos rios, planícies alagáveis e em encostas de morros, aumentando a exposição da população durante o período chuvoso.

Destaca-se que a susceptibilidade de inundação e alagamentos não ocorre em toda a bacia mas sim em pontos específicos, como áreas mais planas próximos a cursos d'água e áreas muito impermeabilizadas, já que suas características físicas desenvolverão maior propensão a sofrer inundações ou alagamentos e se configurarão como parte deste caminho prejudicial para a sociedade. Assim, a conscientização da população e a educação sobre os riscos hidrológicos e as formas de mitigação são fundamentais para reduzir a vulnerabilidade das comunidades.

Ward et al. (2020) enfatizam a importância da gestão integrada de riscos hidrológicos, que considera não apenas as medidas de engenharia tradicionais, como diques e barragens, mas também abordagens baseadas na natureza e estratégias de mitigação baseadas na comunidade. Eles apontam que a colaboração entre diferentes níveis de governo, organizações não governamentais e o setor privado é essencial para implementar soluções eficazes e equitativas, destacando a relevância da inclusão de comunidades vulneráveis no processo de planejamento, garantindo que as soluções sejam adaptadas às necessidades locais e culturalmente apropriadas.

Miguez et al. (2018) discutem que os componentes do risco hidrológico podem ser classificados em tangíveis e intangíveis. Os riscos tangíveis incluem danos materiais, como destruição de infraestrutura, propriedades e danos econômicos. Já os riscos intangíveis englobam aspectos mais difíceis de quantificar,

como impactos psicológicos, perda de qualidade de vida e efeitos sobre a saúde pública.

A compreensão desses componentes é crucial para uma gestão de risco abrangente, que não se limita apenas aos danos físicos, mas também aos efeitos sociais e emocionais que uma inundação pode causar. O intuito é reduzir vulnerabilidades socioeconômicas de cidades que sofre com os riscos hidrológicos ou atuar com medidas de adaptação para melhorar as respostas futuras dos sistemas. Em todas essas atuações o objetivo é de se reduzir a materialização dos danos inerentes ao possível desastre associado ao risco estudado.

Nota-se que diversos autores oferecem perspectivas valiosas sobre a necessidade de uma abordagem integrada e multidisciplinar para a gestão de riscos hidrológicos, que inclua tanto soluções tecnológicas avançadas quanto estratégias comunitárias e baseadas na natureza. Essas abordagens são cruciais para aumentar a resiliência das cidades e comunidades diante dos desafios apresentados pelas mudanças climáticas e pela urbanização.

2.2. VULNERABILIDADE

A vulnerabilidade, como conceito central na gestão de riscos hidrológicos, se refere à capacidade de uma comunidade ou sistema em resistir e se recuperar de eventos extremos, como inundações. White (1945) foi pioneiro ao destacar que a vulnerabilidade não se restringe apenas aos aspectos físicos, mas também envolve fatores sociais e econômicos. Nas décadas seguintes, autores como Blaikie et al. (2014), aprofundaram o entendimento da vulnerabilidade, ligando-a diretamente às desigualdades sociais, argumentando que as populações marginalizadas são mais suscetíveis a desastres naturais.

Essa perspectiva é aprimorada por Birkmann et al. (2013), que ressaltam que a vulnerabilidade é dinâmica, influenciada por variáveis sociais, econômicas e ambientais que podem se modificar com o tempo e as intervenções realizadas.

Cardona (2004) propôs um modelo de análise de vulnerabilidade que integra componentes sociais, econômicos e ambientais, ressaltando a importância de políticas públicas que minimizem os impactos dos desastres. Ele argumenta que a vulnerabilidade é ampliada pela falta de preparação e pela ausência de infraestrutura adequada, o que é especialmente crítico em regiões urbanas

densamente povoadas. Essa perspectiva é aprimorada por Cutter et al. (2003), que introduziram o conceito de “vulnerabilidade social”, enfatizando fatores como pobreza, idade e gênero podem aumentar a exposição aos riscos.

2.3. EXPOSIÇÃO

No contexto dos riscos hidrológicos, o conceito de exposição refere-se ao grau em que pessoas, propriedades, sistemas econômicos e ambientais estão localizados em áreas que podem ser afetadas por eventos hidrológicos adversos, como enchentes, inundações e deslizamentos de terra. A exposição é um dos componentes fundamentais do risco, junto com a vulnerabilidade e a ameaça (ou perigo), e desempenha um papel crucial na determinação do impacto potencial de eventos hidrológicos.

O conceito de exposição também está intimamente ligado ao planejamento urbano. Birkmann (2013) destaca que o planejamento adequado pode reduzir a exposição ao evitar o desenvolvimento em áreas propensas a riscos hidrológicos, como várzeas e margens de rios. Ele argumenta que a integração de mapas de risco no planejamento territorial é essencial para mitigar os efeitos dos desastres naturais.

Na gestão de desastres, a exposição é um dos elementos centrais para avaliar o risco e definir estratégias de mitigação. A United Nations Office for Disaster Risk Reduction - UNISDR (2015), define a exposição como a presença de pessoas, meios de subsistência, espécies, ecossistemas, funções ambientais, serviços e recursos sociais, culturais e econômicos em locais que poderiam ser negativamente impactados por eventos perigosos.

Esses conceitos ilustram como a exposição é uma componente crítica na análise e gestão dos riscos hidrológicos, influenciando diretamente as estratégias de mitigação e a capacidade das cidades e comunidades de se tornarem mais resilientes frente aos desastres naturais.

2.4. RESILIÊNCIA

A resiliência refere-se à capacidade de comunidades, sistemas urbanos e ambientais de resistir, absorver, adaptar-se e recuperar-se eficazmente dos

impactos adversos causados por eventos, como enchentes, inundações e alagamentos. A resiliência não apenas engloba a capacidade de retornar a um estado funcional após um evento, mas também a adaptação contínua para reduzir vulnerabilidades futuras.

Canholi (2005), discute a resiliência dentro da engenharia de drenagem urbana, focando em sistemas que são projetados para não apenas gerenciar águas pluviais de forma eficiente, mas também para se recuperarem rapidamente após eventos hidrológicos extremos. Ele define resiliência como a capacidade dos sistemas de drenagem de absorver e adaptar-se a choques, mantendo sua funcionalidade essencial.

Canholi (2015), argumenta que a resiliência pode ser alcançada por meio da combinação de soluções convencionais e inovadoras, como o desenvolvimento de baixo impacto (LID). Para ele, a engenharia deve priorizar não apenas a prevenção de inundações, mas também a capacidade de adaptação e recuperação dos sistemas urbanos.

Miguez et al. (2018) discutem a resiliência no contexto da gestão urbana de águas pluviais, destacando a importância de um planejamento integrado que considera tanto os aspectos estruturais quanto os não estruturais. Eles argumentam que a resiliência urbana envolve a capacidade de uma cidade não apenas de absorver os impactos das enchentes, mas também de se adaptar e evoluir para reduzir a vulnerabilidade a futuros eventos. O conceito de resiliência, segundo os autores, é multifacetado e inclui a criação de espaços urbanos flexíveis, a implementação de infraestruturas verdes, e a educação e conscientização da população para enfrentar as incertezas climáticas e hidrológicas.

2.5. SUSCEPTIBILIDADE

Segundo Girão, Rabelo e Zanella (2018), a suscetibilidade refere-se à propensão de uma área a ser afetada por eventos adversos, sendo influenciada por características físicas, sociais e ambientais. Os autores ressaltam que essa compreensão é essencial para uma gestão eficaz de riscos, especialmente em contextos urbanos onde a vulnerabilidade é exacerbada por fatores como urbanização descontrolada e mudanças climáticas.

O'brien et. al. (2006), abordam o conceito no contexto das mudanças climáticas, argumentando que as alterações nos padrões de precipitação, causadas pelo aquecimento global, aumentam a susceptibilidade de regiões a enchentes e inundações. Eles apontam que as regiões que já são propensas a extremos hidrológicos serão ainda mais vulneráveis à medida que as mudanças climáticas intensificam esses eventos.

Para Cutter et al. (2003), a relação entre susceptibilidade e vulnerabilidade social, destacando que a susceptibilidade a desastres hidrológicos não é apenas uma questão física, mas também social. Comunidades com menor capacidade socioeconômica, acesso limitado a recursos e infraestrutura inadequada são mais susceptíveis aos impactos de enchentes e outros eventos hidrológicos.

2.6. DESASTRES

De acordo com Wisner et al. (2004), um desastre é definido como um processo que resulta em uma séria interrupção do funcionamento de uma comunidade ou sociedade, causando perdas humanas, materiais, econômicas ou ambientais, que excedem a capacidade da comunidade ou sociedade afetada de lidar com a situação usando seus próprios recursos.

Essa definição destaca a ideia de que desastres não são apenas eventos naturais, mas também são moldados pelas condições sociais, econômicas e políticas que aumentam a vulnerabilidade das populações afetadas.

Segundo a Portaria do Ministério do Desenvolvimento Regional - MDR (2022), os desastres “são produtos e, também, processos decorrentes da transformação e crescimento da sociedade, do modelo global de desenvolvimento adotado, dos fatores socioambientais relacionados a modos de vida que produzem vulnerabilidades sociais e, portanto, vulnerabilidade aos desastres”. São eventos adversos que causam grandes impactos na sociedade, onde esses eventos podem ser diferenciados em função da origem, os ambientais são classificados como humanos ou naturais.

Miguez et. al (2018) conceituam desastres como “consequências de um evento adverso (fenômeno provocado pelo homem e/ou natureza) sobre um ambiente vulnerável, que exceda a capacidade de resposta do sistema social atingido”, ou seja, desastres são efeitos nocivos provocados por eventos

(inundação, tsunami, furacão, terremoto, etc.) no sistema atingido, e não o próprio evento em si.

Esses efeitos, por sua vez, são diretamente proporcionais à vulnerabilidade e à exposição dos elementos em risco em seus diversos aspectos: físico, ambiental, econômico, político, organizacional, institucional, educativo e cultural (Vargas, 2010). Nesse cenário, parcelas da população urbana se encontram expostas ao risco de desastres e são vulneráveis a ocorrência de tragédias que podem gerar danos podendo ser reversíveis ou não.

Miguez et al. (2018) aponta ainda que alguns processos naturais como tsunamis, terremotos e tornados possuem potencial para provocar um desastre natural típico, mas quando se trata de desastres hidrológicos o cenário muda. Isso porque a chuva, por si só, não representa um perigo, mas a partir do momento que fatores internos e externos (vulnerabilidades, uso e ocupação do solo, etc.), provocam/agravam os eventos adversos relacionados a este agente natural, acarretam desastres mistos (socioambientais), que representam um desafio para o planejamento e gestão das cidades brasileiras, tendo em vista que são bastante recorrentes.

A Confederação Nacional de Municípios, através do estudo técnico - Danos e prejuízos causados por desastres no Brasil entre 2013 a 2023 – (2023, local. 1), destaca que os diversos desastres escondem muitas vezes a ausência de políticas públicas de habitação, saneamento básico e infraestrutura eficazes e deixam claro a precariedade da articulação de políticas de prevenção de desastres pelos Entes federados. Peduzzi et al. (2005) argumentam que o conhecimento dos dados específicos acerca dos desastres, com ênfase na localização da ocorrência, é de suma importância para compreender como e por que um fenômeno natural pode se transformar em um desastre.

A classificação e Codificação Brasileira de Desastres (Cobrade) foi criada a partir da Instrução Normativa do Ministério da Integração Nacional nº 01, de 24 de agosto de 2012, definida como um processo de nivelamento dos desastres através de uma codificação internacional que traz as especificidades daqueles existentes no Brasil, mas alinhada com os marcos internacionais de gestão de riscos e desastres. Ao todo são sessenta e cinco definições, que refletem a complexidade que é a gestão de riscos em um país extenso como o Brasil.

No tocante ao grupo dos desastres hidrológicos, a mesma conceitua inundações como uma “submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas. O transbordamento ocorre de modo gradual, geralmente ocasionado por chuvas prolongadas em áreas de planície”. No entanto, inundações podem ocorrer de maneira brusca a depender da topografia da região, que condiciona velocidade de escoamento e o tempo de ocorrência.

Ainda segundo a Cobrade (2012), enxurradas é o escoamento superficial de alta velocidade e energia, provocado por chuvas intensas e concentradas, normalmente em pequenas bacias de relevo acidentado, sendo caracterizada pela elevação súbita das vazões de determinada drenagem e transbordamento brusco da calha fluvial, apresentando elevado poder destrutivo.

A mesma conceitua alagamentos como a extrapolação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem urbana e consequente acúmulo de água em ruas, calçadas ou outras infraestruturas urbanas, em decorrência de chuvas intensas. Pode-se dizer então, que os alagamentos são as falhas dos sistemas de drenagem.

Inundações, enxurradas, alagamentos, deslizamentos de encostas causados pelas chuvas se tornaram cada vez mais severos em decorrência das mudanças climáticas e da intervenção humana. Em relação à intensidade ocasionada pelos desastres, a Portaria do Ministério do Desenvolvimento Regional - MDR (2022), classifica em seu Artigo 5º:

Art. 5º Quanto à intensidade os desastres classificam-se em: I. Desastres de Nível I ou de pequena intensidade: aqueles em que a situação de normalidade pode ser restabelecida com os recursos mobilizados a nível local, por meio do emprego de medidas administrativas excepcionais previstas na ordem jurídica. II. Desastres de Nível II ou de média intensidade: aqueles em que a situação de normalidade precisa ser restabelecida com os recursos mobilizados em nível local e complementados com o aporte de recursos do estado, da União ou de ambos os entes federativos; e III. Desastres de Nível III ou de grande intensidade: aqueles em que se verifica comprometimento do funcionamento das instituições públicas locais ou regionais, impondo-se a mobilização e a ação coordenada das três esferas de atuação do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil, e, eventualmente de ajuda internacional, para o restabelecimento da situação de normalidade.

A portaria identifica três níveis de intensidade de desastres: pequeno, médio e grande porte. Essa classificação é baseada em uma análise detalhada de fatores

como a magnitude do evento, o número de pessoas afetadas, os danos materiais e ambientais, e a capacidade de resposta local. Para desastres de pequeno porte, os impactos são limitados e geralmente podem ser gerenciados com recursos locais. Já os desastres de médio porte exigem uma resposta mais coordenada, envolvendo recursos estaduais ou federais para uma gestão eficaz.

Para desastres de grande porte, a Portaria nº 3.646/2022 indica que os impactos são extensivos, afetando significativamente grandes áreas geográficas e populações. Esses eventos muitas vezes resultam em perdas substanciais de vidas e propriedades, além de exigirem uma resposta abrangente e coordenada de múltiplos níveis de governo e agências.

A portaria enfatiza a importância de sistemas de alerta precoce, planejamento de emergência e capacitação de recursos humanos para lidar com esses desastres. Nesse viés, o estudo da intensidade dos desastres é uma ferramenta crucial para a alocação de recursos e a implementação de medidas de mitigação e recuperação, visando reduzir a vulnerabilidade e aumentar a resiliência das comunidades afetadas.

A dosagem dos meios a serem utilizados pelo poder público é diretamente proporcional à intensidade dos danos e prejuízos provocados, que vão desde o decreto de ações de situação de emergência, até o estado de calamidade pública, com aporte de ajuda internacional.

2.7. AÇÕES DE MITIGAÇÃO

2.7.1. Histórico

O Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), através do Banco de Dados Internacional de Desastres (EM-DAT), documenta desastres hidrológicos globais, fornecendo informações detalhadas sobre eventos como inundações, enchentes rápidas, e outros movimentos de massa causados por água. De acordo com o relatório anual para o ano de 2019, as inundações e as tempestades foram os desastres naturais que mais causaram mortes e prejuízos financeiros em todo o mundo.

O CRED destaca que esses desastres têm um impacto severo, não apenas em termos de danos materiais, mas também na saúde pública e na economia das

áreas afetadas. A coleta de dados do EM-DAT inclui informações sobre o número de mortes, feridos, pessoas afetadas, e a extensão dos danos econômicos, ajudando a contextualizar a gravidade e a frequência desses eventos.

No âmbito nacional, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) é uma instituição criada para monitorar e emitir alertas sobre desastres naturais, como inundações, deslizamentos de terra e enxurradas. Com o objetivo de minimizar os impactos desses eventos na população e na infraestrutura, o Cemaden utiliza tecnologias avançadas de monitoramento, como sensores de chuvas e radares meteorológicos. Além disso, a instituição promove a pesquisa e a capacitação para a gestão de riscos, colaborando com diversos órgãos públicos e a sociedade civil.

A urbanização crescente e a modificação do uso do solo, como a impermeabilização das superfícies urbanas, amplificam os efeitos dos desastres hidrológicos. A falta de infraestrutura adequada de drenagem e a ocupação de áreas de risco, como margens de rios e encostas, aumentam a exposição a inundações e deslizamentos. Essas atividades humanas não só aumentam a frequência dos eventos, mas também ampliam seu impacto em termos de danos materiais e perdas de vidas.

A Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano (SRHU), ligada ao Ministério do Meio Ambiente, propõe políticas e estratégias para a gestão integrada dos recursos hídricos no meio urbano com desenvolvimento de baixo impacto, centrado na prevenção de inundações, de maneira a evitar a perda de vidas e de patrimônio.

Embora a SRHU estabeleça diretrizes fundamentais para a gestão sustentável das águas urbanas, incluindo a prevenção de inundações e a proteção das Áreas de Preservação Permanente (APPs), sua atuação se limita à criação de normas e recomendações. A implementação efetiva dessas diretrizes, no entanto, depende dos municípios, que recebem a responsabilidade de traduzir essas orientações em ações concretas por meio de seus planos diretores. Esse repasse de responsabilidade acaba por gerar uma lacuna na articulação de políticas públicas integradas, que poderiam ser mais eficazes se conduzidas de forma coordenada entre as esferas federal, estadual e municipal.

No Brasil, a proteção e defesa de suas populações frente aos desastres é desempenhada pelo Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC), que

possui a finalidade de garantir direitos à vida, à saúde, à segurança e à incolumidade a todos os brasileiros e aos estrangeiros que residem no Brasil.

Sob o olhar detalhado de um contexto brasileiro sobre a Gestão Integrada de Riscos e Desastres (GIRD), aprofunda-se historicamente que nos últimos 30 anos houve um avanço associado à comoção temporária devido à ocorrência de desastres de maior magnitude (Brasil, 2021). O caso da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) exemplifica bem essa dinâmica. Construída a partir do desastre na região Serrana do Rio de Janeiro em 2011, trouxe um grande avanço ao integrar políticas públicas federais com vistas ao desenvolvimento sustentável e à prevenção, à mitigação, à preparação, à resposta e à recuperação voltadas para proteção e defesa civil.

A primeira estrutura governamental de resposta aos desastres surgiu no Brasil durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), mas a Defesa Civil só ganhou corpo e presença efetiva nos estados no final dos anos 1960 (MRD, 2021, local. 28). No final da década de 1980, houve um importante passo para o desenvolvimento das ações de Proteção e Defesa Civil foi a criação do Sistema Nacional de Defesa Civil (Decreto nº 97.274/1988), bem como grandes avanços acadêmicos sobre a temática de riscos e desastres.

Já na década de 1990 programas de caráter preventivo começaram a ser implementados pelos governos estaduais de diversas cidades brasileiras, testando metodologias e validando práticas de GRD baseadas em mapeamentos e planos de contingência. Nos anos 2000, o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil se expande pelos estados e municípios, ganhando importante suporte legal. Assim, as políticas de GRD começam a ter expressão nacional, integradas às políticas urbanas (Brasil, 2021).

Alguns desastres ocorridos na virada da década de 2000 para os anos 2010 impõem uma importante mudança nas ações, legislações e estruturas de GRD no país. Destacam-se três casos: o desastre do Vale do Itajaí (SC) em 2008, as inundações em Pernambuco em 2010 e o desastre da Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, em 2011. Juntas, afetaram 500 mil pessoas e resultaram em prejuízos bilionários.

O grande desastre da Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, ocorrido em 2011, quando chuvas torrenciais em sete municípios causaram a morte de mais de 900 pessoas e afetaram mais 300 mil pessoas, pode ser considerado um divisor

de águas na gestão de riscos e desastres no Brasil. O estado de calamidade pública motivou uma série de medidas para fortalecimento, aprimoramento e integração, entre elas:

- Criação do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (Cemaden) em 2011 com o uso de tecnologias modernas de monitoramento e previsões hidrometeorológicas e geodinâmicas (Marchezini et al., 2017);
- Lançamento do Programa de Gestão de Risco e Resposta a Desastres no Plano Plurianual (PPA) 2012-2015, com atuação e recursos do governo federal no tema da gestão de riscos;
- Criação do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC II), especialmente o Programa Minha Casa Minha Vida, com grandes investimentos em intervenções estruturadoras especialmente relacionadas ao déficit habitacional;
- O então Sistema Nacional de Defesa Civil para Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC) que após a promulgação da Lei Federal 12.608/2012, virou Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC).

As ações de gestão de desastres desempenham um papel crucial na mitigação dos impactos de catástrofes naturais, como as inundações severas que ocorreram no Rio Grande do Sul no final de abril de 2024. As inundações foram consideradas as piores em mais de 80 anos, com chuvas intensas que afetaram 478 dos 497 municípios do estado, resultando em pelo menos 182 mortes confirmadas, 29 desaparecidos e 806 feridos, com mais de 422.000 pessoas deslocadas (Brasil, 2024).

Esses números demonstram a importância de uma resposta eficiente e coordenada, que envolve desde o resgate de pessoas até a implementação de abrigos temporários e a recuperação da infraestrutura crítica, como estradas e redes de comunicação.

Além das perdas humanas, os prejuízos materiais foram imensos. Estima-se que o custo de reconstrução do estado pode chegar a R\$ 19 bilhões (aproximadamente US\$ 3,7 bilhões), com 200.000 casas danificadas ou destruídas e 45.000 negócios afetados apenas em Porto Alegre (O GLOBO, 2024). Esses números sublinham a necessidade de investimentos significativos em medidas de

adaptação e mitigação, que incluem o fortalecimento das infraestruturas para torná-las mais resilientes a eventos climáticos extremos e a necessidade de assistência humanitária eficaz durante e após a ocorrência de tais desastres.

Outro aspecto crítico é o impacto econômico, particularmente no setor agrícola, que sofreu perdas de mais de R\$ 2,7 bilhões (US\$ 521 milhões) em plantações e R\$ 245 milhões (US\$ 47 milhões) na pecuária (O GLOBO, 2024). O estado, que é um dos principais produtores agrícolas do Brasil, viu sua economia fortemente abalada, com previsões de uma queda de até 4% no PIB local em 2024. Isso demonstra como desastres naturais podem ter repercussões de longo prazo, afetando a produção, o emprego e a estabilidade econômica de regiões inteiras.

Finalmente, a resposta ao desastre destacou as disparidades sociais e a vulnerabilidade de comunidades marginalizadas, como favelas, comunidades quilombolas e aldeias indígenas, que foram duramente atingidas. A falta de infraestrutura adequada e as condições socioeconômicas precárias exacerbam os impactos de tais desastres, evidenciando a necessidade de políticas públicas que priorizem essas populações em programas de prevenção, preparação e resposta a desastres, além de estratégias de desenvolvimento sustentável que reduzam essas vulnerabilidades estruturais.

2.7.2. Competências

A Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) orienta a GRID no Brasil. Indica a integração de políticas públicas voltadas para o desenvolvimento sustentável. Aponta ainda ações organizadas nas etapas de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação no âmbito da Proteção e Defesa Civil (Brasil, 2012). Além disso, trouxe inovações, como abordagem sistêmica, foco na prevenção e participação social, como expresso em suas seis diretrizes impostas no Art. 4º:

Art. 4º São diretrizes da PNPDEC: I - atuação articulada entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios para redução de desastres e apoio às comunidades atingidas; II- abordagem sistêmica das ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação; III - a prioridade às ações preventivas relacionadas à minimização de desastres; IV - adoção da bacia hidrográfica como unidade de análise das ações de prevenção de desastres relacionados a corpos d'água; V- planejamento com base em pesquisas e estudos sobre áreas de risco e incidência de desastres no território nacional; VI - participação da sociedade civil.

Essas diretrizes são essenciais porque orientam a atuação dos entes federativos na prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação frente a desastres. Elas promovem a integração entre os diversos níveis de governo e setores da sociedade, assegurando que as ações de proteção civil sejam coordenadas e eficazes.

Além disso, o artigo ressalta a importância de se considerar as peculiaridades locais, garantindo que as medidas adotadas sejam adaptadas às necessidades específicas de cada região, o que é crucial para minimizar os impactos de desastres naturais e tecnológicos no país.

Miguez et al. (2018) afirma que a abordagem da gestão integral de riscos é baseada numa visão sistêmica do ciclo de vida dos desastres e busca definir um fluxo de atividades e processos para a redução e a mitigação a partir dos macroprocessos de prevenção, mitigação, preparação, resposta e reconstrução.

As ações relacionadas ao período concomitante ao desencadeamento de um fenômeno ou àquele posterior a ele (ações de resposta e recuperação) compõem o gerenciamento de desastres (CEPED/RS, 2016). Juntas, essas ações compõem o Ciclo de Gestão de Proteção e Defesa Civil (Figura 1), baseado em três momentos: antes, durante e após a ocorrência de um desastre (BRASIL, 2012).

Figura 1- Ciclo de gestão de risco e gerenciamento de desastre e proteção em defesa civil



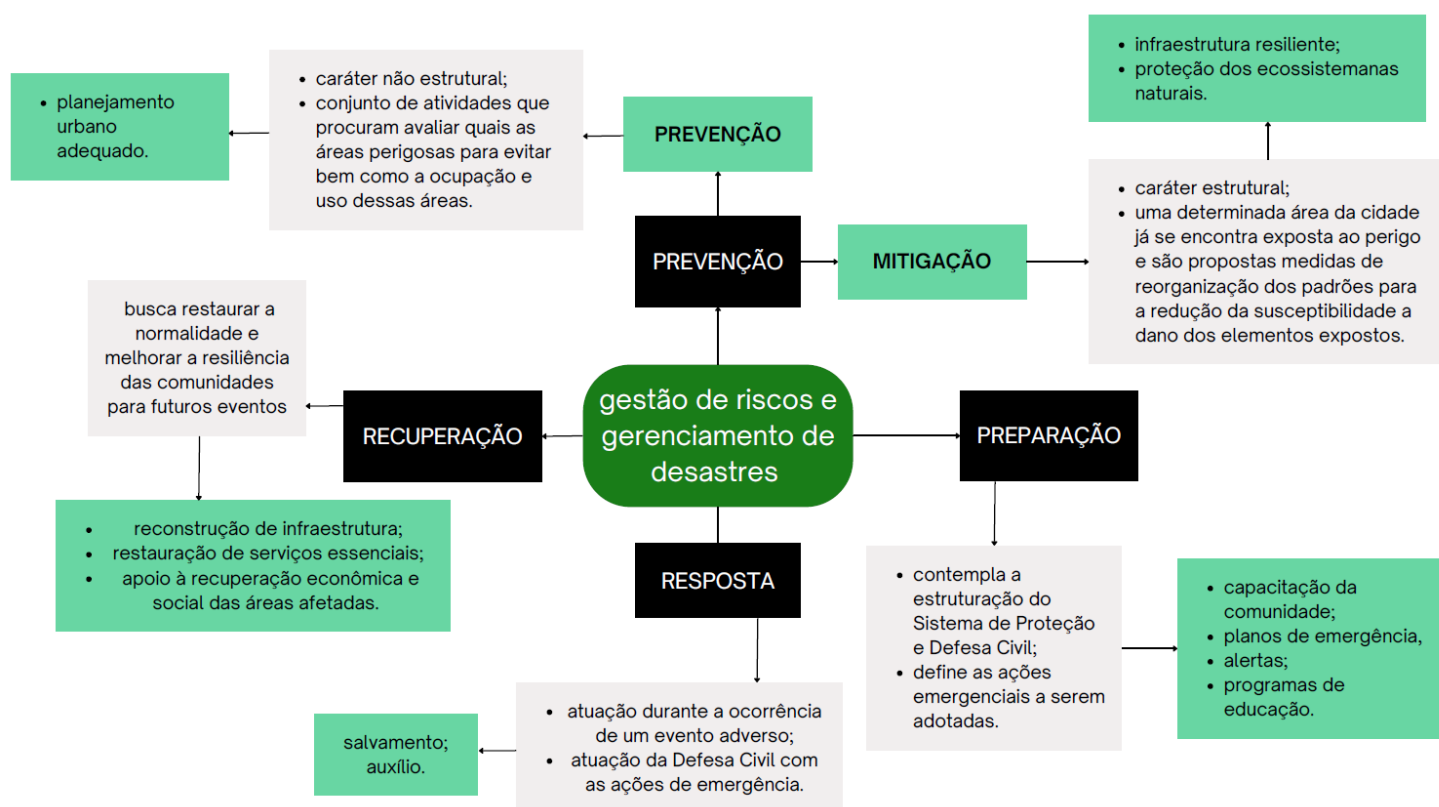
Fonte: CEPED/RS (2016).

O ciclo de gestão de risco e gerenciamento de desastres é um processo contínuo e dinâmico que visa minimizar os impactos adversos de eventos extremos sobre a sociedade e o meio ambiente. Este ciclo é comumente dividido em quatro fases principais: prevenção e mitigação, preparação, resposta e recuperação. Cada

fase desempenha um papel crucial na redução da vulnerabilidade e no fortalecimento da resiliência das comunidades.

A Figura 2 abaixo ilustra um organograma que descreve o ciclo de gestão de riscos, fundamental para a compreensão de como as organizações e comunidades podem se preparar para eventos adversos, como desastres naturais. O ciclo é composto por várias etapas interconectadas, incluindo a identificação de riscos, avaliação, mitigação, preparação, resposta e recuperação.

Figura 2 – Organograma do ciclo de gestão de riscos



Fonte: Autores (2024)

Para Miguez et al. (2018) a fase de Prevenção se desdobra em duas, com função de prevenir resultados danosos do desastre, mas que ocorrem em momentos diferentes. Primeiramente, a prevenção propriamente dita, de caráter não estrutural, sendo um conjunto de atividades que procuram avaliar quais as áreas perigosas para evitar bem como a ocupação e uso dessas áreas. Posteriormente, a Mitigação, de caráter estrutural, na qual uma determinada área da cidade já se encontra exposta ao perigo e são propostas medidas de reorganização dos padrões para a redução da susceptibilidade a dano dos elementos expostos.

De acordo com Wisner et al. (2012), a mitigação é fundamental para a construção de resiliência a longo prazo e para a minimização dos danos quando desastres ocorrem. Estratégias como a regulamentação do uso do solo e a adoção de práticas agrícolas sustentáveis são exemplos de medidas de mitigação que podem reduzir a exposição a riscos. Assim, prevenção e mitigação envolvem a implementação de medidas para reduzir os riscos de desastres antes que ocorram. Isso inclui o planejamento urbano adequado, a construção de infraestrutura resiliente e a proteção dos ecossistemas naturais, que podem servir como barreiras contra inundações e outros eventos extremos.

A preparação contempla a estruturação do Sistema de Proteção e Defesa Civil e define as ações emergenciais a serem adotadas na iminência de um desastre, incluindo a preparação institucional e operacional, a definição de planos de contingência, ações de monitoramento e alerta (Miguez et al., 2018).

De acordo com Alexander (2002), a preparação eficaz envolve não apenas a elaboração de planos, mas também o treinamento contínuo e a educação das populações vulneráveis para garantir que saibam como agir em situação de emergência. A tecnologia desempenha um papel crucial nesta fase, com sistemas de alerta precoce que permitem que as comunidades recebam informações críticas em tempo hábil.

O caderno de técnico de GIRD (Brasil, 2021) informa que mesmo atuando na prevenção e mitigação dos riscos de desastres, é fundamental estar preparado para desastres e emergências, afirmando que o objetivo do eixo estratégico de manejo dos desastres e emergências é qualificar o pronto-atendimento de emergências e o atendimento de desastres. Cita ainda que pode ser feito por meio do planejamento de operações para cada tipo de ameaça, de treinamentos e exercícios simulados de preparação para desastres e da organização de recursos e estruturas operacionais.

A fase de preparação é focada na capacitação das comunidades para responder eficazmente aos desastres. Isso inclui o desenvolvimento de planos de emergência, exercícios de simulação e programas de educação pública para aumentar a conscientização e a prontidão.

A segunda parte do ciclo, ou seja, o gerenciamento de desastres, refere-se à atuação durante a ocorrência de um evento adverso, ou seja, relaciona-se à resposta, envolvendo principalmente a atuação da Defesa Civil com as ações de

emergência. Nesse caso, a finalidade maior envolve, segundo Marcelino (2008, p.27), “o salvamento (socorro e assistência às vítimas), e o auxílio (evacuação, abrigo, alimentação, atendimento médico, etc.)”. Miguez et al. (2018) acrescenta que esta fase inicia com o alarme disparado e continua até após a ocorrência dos desastres, compreendendo a avaliação dos danos e ações básicas de recuperação funcional dos sistemas afetados.

Esta fase requer uma coordenação eficaz entre diversas agências governamentais, ONGs e o setor privado. Tierney (2019, p. 3-19) destaca que "uma resposta eficaz depende de uma coordenação interinstitucional robusta e da mobilização rápida de recursos, incluindo equipes de resgate, equipamentos médicos e suprimentos de emergência". A comunicação eficiente e a logística são componentes críticos para garantir que a assistência chegue aonde é mais necessária.

Finalmente, a fase de recuperação busca restaurar a normalidade e melhorar a resiliência das comunidades para futuros eventos. Esta fase pode incluir a reconstrução de infraestrutura, a restauração de serviços essenciais e o apoio à recuperação econômica e social das áreas afetadas.

Conforme Marcelino (2008) a avaliação dos danos compreende esta fase, bem como a reconstrução das estruturas que foram danificadas ou destruídas. Para Miguez (2018), esta fase tem por finalidade o reestabelecimento de sua plenitude: serviços públicos essenciais, economia da área, bem-estar da população e moral social.

Cutter et al. (2014, p. 65-77) sugerem que "a recuperação não deve apenas restaurar o status quo, mas também integrar princípios de reconstrução sustentável e resiliência para reduzir a vulnerabilidade a desastres futuros". A recuperação também oferece uma oportunidade para aprender com o evento e implementar melhorias em políticas e práticas de gestão de riscos.

O ciclo de gestão de risco e gerenciamento de desastres é, portanto, um processo iterativo que exige uma abordagem integrada e colaborativa, envolvendo governos, comunidades, cientistas e o setor privado. A eficácia desse ciclo depende da capacidade de adaptação e da implementação contínua de novas tecnologias e conhecimentos para enfrentar os desafios emergentes relacionados aos desastres naturais e às mudanças climáticas.

2.8. DRENAGEM TRADICIONAL X DRENAGEM SUSTENTÁVEL

Países em desenvolvimento como o Brasil, observa-se o crescimento desordenado de algumas cidades sem controle adequado sobre o uso do solo e sem uma vinculação ao Plano Diretor Urbano. A cidade como o ponto de atração, favorecendo a migração na busca de melhores condições de vida, sofre um aumento populacional não programado acarretando impactos sociais e ambientais.

Estes impactos são provocados principalmente pela falta de infraestrutura necessária devido à ocupação desordenada em zonas críticas, ausências de sistemas de abastecimento de água e coleta de esgoto doméstico, bem como de um sistema captação de água de escoamento superficial. Em relação à drenagem de águas pluviais, o principal problema está relacionado com a frequência nas ocorrências de alagamentos urbanos, gerando um viés de degradação ao longo do tempo.

Assim, pode-se dizer que o problema das cheias urbanas se materializa como um dos principais desafios das grandes cidades na atualidade, já que os prejuízos são inúmeros, afetando diversos aspectos da vida urbana, interferindo nos setores de habitação, transporte, saneamento e saúde pública (Miguez *et al.*, 2018).

Ao longo de décadas, a canalização foi considerada a intervenção mais comum e eficaz para controlar os níveis de inundação, que costumavam ser amplificados pelo crescimento da cidade (Bahense, 2013). Mas, nas últimas três décadas, a abordagem tradicional para projetos de sistemas de drenagem urbana começou entrar em declínio, dentre outros motivos por não se mostrar sustentável.

Os sistemas tradicionais de drenagem urbana são constituídos, tipicamente, pela rede de transporte de escoamento. As soluções mais empregadas consistem na construção de canalizações, seja na forma de condutos subterrâneos ou canais abertos. Esses sistemas têm por finalidade a captação e direcionamento da água pluvial para fora do meio urbano no menor tempo possível.

Ocorre que esta concepção de projeto de drenagem tende a acelerar e ampliar as descargas de pico. Além disso, ao promover o transporte rápido do escoamento em meio a crescente impermeabilização do espaço urbano, essas soluções apenas contribuem para o aumento da ocorrência de inundações à jusante das áreas drenadas.

A ampliação dos sistemas de drenagem existentes nesses locais torna-se muitas vezes impraticável, pelos altos custos sociais envolvidos e pelos elevados investimentos necessários a implantação de obras hidráulicas de grande porte. Em muitos casos, por causa do alto custo ou da impossibilidade de desapropriação de áreas ribeirinhas, bem como pela necessidade de interrupção do trajeto, a solução requer a utilização de métodos executivos sofisticados e, portanto, custosos (Canholi, 2005).

A Lei Federal nº. 11.445/2007 estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico e o item “d” do inciso I do art. 3º define quanto à drenagem:

[...] d) drenagem e manejo das águas pluviais urbanas: constituídos pelas atividades, pela infraestrutura e pelas instalações operacionais de drenagem de águas pluviais, transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas, contempladas a limpeza e a fiscalização preventiva das redes [...]. (Redação pela Lei nº 14.026, de 2020).

Diante das atualizações ocorridas em prol da eficiência dos sistemas de drenagem, nota-se a importância de se adequar procedimentos para ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação de desastres socioambientais, com foco nos desastres hidrológicos decorrentes do período de cheias.

Segundo Tavanti (2009), as técnicas compensatórias, além de permitirem a integração de sistemas clássicos de drenagem com elementos urbanos e paisagísticos, possibilitam a adaptação do sistema de drenagem ao crescimento urbano. Isso contribui para a redução dos custos associados à infraestrutura de drenagem tradicional.

Neste diapasão, o sistema de drenagem tradicional tem se mostrado inadequado e ineficiente, sendo necessário tomar medidas mais sustentáveis não só em termos de controle de enchentes nas áreas urbanas, mas também em termos de qualidade da água, qualidade de vida da população e meio ambiente e sustentabilidade.

Segundo Tucci (2014), drenagem urbana, no seu sentido intrínseco, pode ser mensurada como o conjunto de medidas, que tem por objetivo minimizar os riscos a que as populações estão sujeitas, ocasionadas pela intensa urbanização,

diminuindo os prejuízos causados por inundações e permitindo o desenvolvimento urbano de forma harmônica, planejada e sustentável.

Miguez et al. (2018) afirma que a cidade sustentável não é estática, ela deve ser capaz de manter suas características funcionais ao longo do tempo e não pode transferir impactos no espaço. Seguindo essa linha de raciocínio, surgiram os conceitos de drenagem compensatória ou BMP (*Best Management Practice*) e LID (*Low Impact Development*), com o objetivo de reduzir a quantidade e vazão de água obtida antes do processo de urbanização.

2.9. TÉCNICAS (LID)

O desenvolvimento urbano sustentável busca atingir o propósito de gerar um ambiente saudável, reduzindo a poluição e controlando a quantidade de água da chuva, desta forma evitando o impacto negativo dos eventos de precipitação. Com o intuito de reduzir os danos a bacia hidrográfica, as técnicas compensatórias surgem como uma configuração de planejamento urbano.

Tal fato permite que a adoção de medidas compensatórias seja uma oportunidade de valorização do espaço, já que as consequências das possíveis restrições associadas trazem uma aproximação do ambiente construído ao ambiente natural, aumentando assim, a biodiversidade, que são objetivos compatíveis com os conceitos de drenagem urbana sustentável. Percebe-se que a sustentabilidade, redução de riscos e aumento da resiliência caminham juntas.

Um estudo demonstrou que técnicas compensatórias de drenagem, como a infraestrutura verde e azul, são eficazes no combate às enchentes e proporcionam diversos benefícios aos ambientes urbanos. Por exemplo, a aplicação de soluções baseadas na natureza (Nature-Based Solutions - NBS) em cidades como Cingapura e outras regiões da Ásia mostra que essas práticas não apenas ajudam a mitigar inundações, mas também melhoram significativamente a qualidade da água ao reter sedimentos e poluentes, além de serem viáveis economicamente (Sović Kržić, 2020).

De acordo com Ribeiro (2014), os Estados Unidos têm um conhecimento extenso na área de gestão de drenagem devido ao seu pioneirismo no desenvolvimento de normas específicas. O Canadá segue uma linha semelhante, adaptando as normas americanas, mas com uma organização própria. Além de

conceitos como BMP (Best Management Practices), os EUA desenvolveram a abordagem LID (*Low-Impact Development*), que utiliza o modelo SWMM (*Storm Water Management Model*).

Diferentemente das técnicas compensatórias, que buscam mitigar os problemas de drenagem já existentes, o LID adota uma postura preventiva, já que o foco dessa abordagem é o controle da água diretamente no local de origem, evitando que se transformem em escoamento superficial significativo. Esse controle pode ser alcançado através de práticas como a divisão de terrenos em lotes menores e a preservação de áreas verdes amplas. Essa adaptação às características da paisagem local é conhecida como Prática Integrada de Gerenciamento (IMP - *Integrated Management Practices*).

O LID considera a drenagem urbana de forma integrada, tentando resgatar as características naturais do ciclo hidrológico, enquanto agrega valor à própria cidade. Para tanto, adota um conjunto de procedimentos que tentam compreender e reproduzir o comportamento hidrológico anterior à urbanização, considerando o balanço hídrico da fase do pré-desenvolvimento (Miguez *et al.*, 2018).

Ciria (2015), aponta que o uso de LIDs pode melhorar a resiliência das cidades a cheias e alagamentos, configurando-se em uma resposta consistente para a variabilidade climática que aflige as soluções tradicionais de drenagem.

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

Apesar de toda a abordagem do Ministério das Cidades, ainda não há no Brasil uma legislação específica para o emprego das técnicas das LIDs (Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto). Porém, vale ressaltar que existem algumas legislações que podem desencadear o emprego de tais técnicas.

A Lei Federal nº 10.257 de 2001 (Brasil, 2001), conhecida como Estatuto da Cidade, estabelece instrumentos de política urbana que podem ser utilizados de forma eficaz no controle dos impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico e os recursos hídricos, incluindo estudos de impacto de vizinhança e planos de ordenação territorial.

A Lei Federal nº 11.445 de 2007 (Brasil, 2007) estabelece diretrizes para o saneamento básico e abre novas perspectivas institucionais para a concepção de águas pluviais. Existem ainda algumas legislações municipais específicas, como no caso do município de Teresina, a Lei nº 5.841 de 2019 (Teresina, 2019), que dispõe sobre o Plano Diretor Ordenamento Territorial – PDOT.

Esse plano é o instrumento básico da política de desenvolvimento e expansão urbana, pois é ele quem deve promover o diálogo entre os aspectos físicos/territoriais e os objetivos sociais, econômicos e ambientais para a cidade. O plano deve ter como objetivo distribuir os riscos e benefícios da urbanização, induzindo um desenvolvimento mais inclusivo e sustentável. Em seu Art. 30:

Art. 30. São diretrizes a serem adotadas na estratégia Qualidade do Ambiente: [...] XXII - Nas áreas urbanas com ocupação consolidada adotar reservatórios de amortecimento e estratégias de reaproveitamento de águas pluviais, sempre que possível, combinando estes com a ampliação dos serviços de drenagem e manejo das águas pluviais urbanas; XXIII - Regulamentar as exigências em relação à drenagem urbana, incluindo o uso de reservatórios de amortecimento, de acordo com normativa municipal ou plano municipal de drenagem vigente; XXXVIII - Incentivar a implantação de "telhados verdes" e "fachadas verdes"; [...].

A mesma legislação ainda afirma em seu artigo 31:

Art. 31. O Executivo Municipal deverá estimular, através de incentivos fiscais, a adoção de procedimentos sustentáveis relacionados à conservação dos recursos naturais, à qualidade ambiental, à drenagem e às edificações, a serem regulamentados nos códigos legais competentes. Parágrafo único. Considera-se, dentre outros, como procedimentos sustentáveis: [...] IV - A adoção de telhados ou fachadas verdes; V - A coleta e reutilização das águas pluviais; VI - A adoção de taxas de permeabilidade no lote maiores do que as exigidas neste PDOT; VII - A adoção de materiais construtivos certificados ambientalmente; [...].

Segundo Pazwash (2011), o processo de planejamento com essas técnicas pode ser potencializado por novas regras de zoneamento de uso e solo, apontando alguns benefícios por meio de suas implantações:

- Diminuição da terraplenagem e limpeza do terreno de forma a reduzir a erosão e assoreamento;
- Minimização dos escoamentos superficiais majorados pela implantação de áreas com pavimentos impermeáveis;

- Diminuição das áreas diretamente conectadas à rede de drenagem, com telhados e pisos drenando para superfícies permeáveis ou vegetação;
- Aumento do caminhamento das águas de forma a aumentar o tempo de concentração.

Verifica-se que o planejamento de novas áreas baseado no conceito de desenvolvimento de baixo impacto passa por um processo diferenciado, considerando as características naturais do terreno de forma a minimizar os impactos causados pela urbanização (Miguez, et al. 2018).

É nesse contexto que o desenvolvimento urbano de baixo impacto hidrológico surge como uma medida de mitigação de riscos, evitando que áreas periurbanas ampliem a extensão de regiões originalmente perigosas, incluindo novas áreas anteriormente fora do risco mapeado.

Conforme apontado por Baptista et al. (2005), as técnicas compensatórias são divididas em duas categorias: estruturais e não estruturais. As técnicas não estruturais incluem práticas que retardam o escoamento por meio de medidas como regulamentações legais, planejamento do uso do solo e iniciativas de educação ambiental. Já as técnicas estruturais, por sua vez, são classificadas de acordo com seu mecanismo de funcionamento e o local de instalação dos dispositivos.

2.9.1. Medidas compensatórias não estruturais

Segundo Tucci (2005), medidas não estruturais são preventivas, pois atuam na previsão e monitoramento de cheias e no zoneamento de áreas de risco. No entanto, ainda há a necessidade de promover ações e políticas que conscientizem tanto os planejadores quanto a sociedade para alterar o quadro de urbanização desordenada.

As técnicas compensatórias não estruturais visam estabelecer diretrizes para o uso do solo, com o intuito de reduzir o impacto do escoamento superficial de maneira preventiva. A gestão se fundamenta no plano diretor, que define, entre outras ações, limites para a impermeabilização dos solos e incentivos fiscais para práticas que diminuam essa impermeabilização.

Essas limitações são difíceis de serem contornadas *a posteriori*, por isso, é importante integrar o desenvolvimento urbano com os limites impostos pela bacia

natural, a fim de que seja efetivo o controle do risco e a configuração de uma área urbana mais sustentável e resiliente.

Além disso, a comunidade deve estar ciente de sua participação para a eficácia desses resultados, pois a falta de informação e a percepção negativa em relação às medidas de desenvolvimento de baixo impacto hidrológico, são fatores que podem impedir a sua implementação. Para tanto, é necessário que seja desenvolvido um trabalho de educação ambiental junto à sociedade para torná-lo viável e de boa aceitação.

2.9.2. Medidas compensatórias estruturais

As medidas de compensação estrutural são projetos desenvolvidos para mitigar ou contrabalançar o aumento do escoamento superficial decorrente da urbanização e da consequente impermeabilização do solo. Woods-Ballard et al. (2015) afirmam que as principais medidas sustentáveis empregadas são os sistemas de captação de água pluvial, telhados verdes, sistemas de infiltração, sistemas de tratamento, faixas filtrantes, valas revestidas com cobertura vegetal, sistemas de biorretenção, árvores, pavimentos permeáveis, tanques de armazenamento e atenuação, bacias de retenção e lagoas e zonas úmidas.

A seguir, serão detalhadas algumas dessas tecnologias, com especial atenção àquelas que serão utilizadas neste estudo para abordar o escoamento superficial na área de interesse, sendo consideradas como hipótese para a mitigação do risco hidrológico.

2.9.2.1. Telhado verde

Os telhados verdes também conhecidos como coberturas vegetadas, são sistemas de cobertura que incluem vegetação e uma camada de substrato plantada sobre uma membrana impermeável. Os TV têm sido amplamente explorados como uma medida eficaz de desenvolvimento de baixo impacto, apesar de historicamente, o seu uso não ser incentivado devido a preocupações com a impermeabilização e a integridade dos elementos estruturais e do telhado das residências (WANG, 2022).

No entanto, projetos mais modernos estão incorporando vários métodos de retenção para melhorar o desempenho e ajudar a atender aos requisitos de

permeabilidade dos lotes (Jeffers, 2022). As camadas principais incluem a impermeabilização, que protege a laje contra infiltrações; o sistema de drenagem, que permite o controle do excesso de água; e o substrato, que sustenta a vegetação e promove a retenção de água. (Figura 2).

Figura 3 – Camadas do telhado verde



Fonte: ECOTECNOLOGIAS (2020)

Esses sistemas são reconhecidos por suas vantagens em termos de isolamento acústico e regulação térmica, resultando em economia energética, especialmente em áreas urbanas densas. Além disso, coberturas verdes contribuem para a melhoria da qualidade do ar, filtrando poluentes e criando microclimas que atraem diversas espécies, promovendo a biodiversidade urbana. Também são eficazes no controle do escoamento pluvial, ajudando a reter e reter a água da chuva, o que alivia a pressão sobre os sistemas de drenagem urbana e mitiga o risco de enchentes, conforme discutido por Tassi, Mainier, e Souza (2014) e Jobim (2013).

Ahiablame et al. (2012) afirmam que a retenção do escoamento pelos telhados verdes varia cerca de 20 % a até 100%. Entretanto, cabe ressaltar que, com o aumento da chuva, esse desempenho tende a diminuir. Assim, uma vez que a capacidade de retenção do telhado verde seja alcançada, a água excedente será convertida em escoamento superficial.

Os telhados verdes podem ser classificados em três categorias principais: intensivos, extensivos e semiextensivos, com características e finalidades distintas

que variam conforme a profundidade do substrato, a escolha das plantas e os requisitos estruturais do edifício.

Os telhados verdes intensivos possuem uma camada de substrato mais espessa (normalmente entre 15 e 30 cm ou mais), o que permite o cultivo de uma grande variedade de plantas, incluindo gramados, arbustos e até árvores pequenas. Esse tipo de telhado verde se assemelha a um jardim tradicional, requerendo manutenção regular e sistemas de irrigação para garantir o desenvolvimento das espécies.

Devido às exigências estruturais para suportar o peso desse sistema, Oberndorfer et al. (2007) afirma que edifícios com estrutura robusta, como telhados planos de concreto são os mais adequados, o que gera um custo de implementação e manutenção relativamente alto. Assim, sua aplicabilidade torna-se inviável em construções que não possuam recursos adequados para suporte estrutural e financeiro (Bevilacqua et al., 2018).

Os telhados verdes extensivos, por sua vez, apresentam uma camada de substrato mais rasa, geralmente entre 5 e 15 cm, e são projetados para suportar plantas de baixa manutenção e espécies resistentes à seca. Por serem mais leves, exigem menos reforço estrutural, tornando-os uma opção mais viável para diversos tipos de edificações, inclusive telhados inclinados.

Esses telhados são geralmente acessíveis apenas para manutenção e inspeções esporádicas, exigindo pouca intervenção após sua instalação inicial (Dvorak e Volder, 2010). A principal vantagem dos telhados extensivos é sua eficiência em termos de custo e baixo impacto estrutural, o que contribui para sua ampla adoção em edificações residenciais e comerciais que buscam uma solução econômica e sustentável.

Os telhados semiextensivos representam uma solução intermediária, combinando características dos sistemas intensivos e extensivos. Eles possuem uma camada de substrato com espessura entre 10 e 20 cm, o que permite uma diversidade vegetal maior do que os extensivos, mas sem o peso e os requisitos estruturais dos sistemas intensivos.

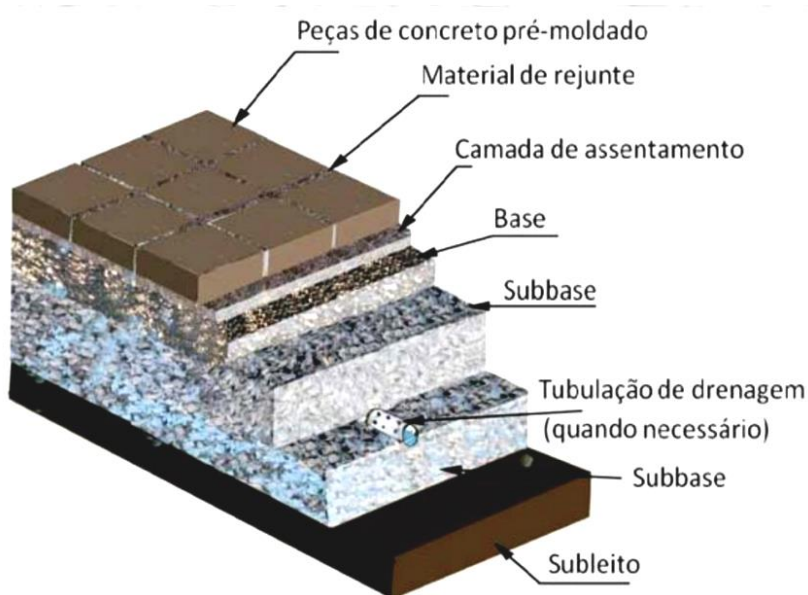
Os semiextensivos podem suportar plantas de médio porte e arbustos, sendo adequados para projetos que desejam uma cobertura vegetada com mais biodiversidade, mas com um custo e uma demanda de manutenção mais baixos do que os telhados intensivos (Castleton et al., 2010). Esses sistemas oferecem um

equilíbrio interessante entre estética, funcionalidade e requisitos estruturais, sendo uma escolha popular para projetos que buscam uma solução ecológica sem comprometer a viabilidade financeira.

2.9.2.2. Pavimentos permeáveis

Em US EPA (2000), os pavimentos permeáveis são definidos como coberturas que permitem a infiltração das águas pluviais em solos subjacentes, reduzindo, portanto, o escoamento superficial e promovendo a remoção de poluentes e a recarga de águas subterrâneas. A figura 3 mostra uma imagem esquemática do pavimento permeável.

Figura 4 - Pavimento permeável (tipo intertravado)



Fonte: PITTA (1998)

Seu funcionamento consiste na infiltração do escoamento através do pavimento poroso, em seguida o escoamento atravessa o filtro e a manta permeável de proteção do reservatório inferior. Este reservatório ocupado por brita permite a infiltração para o subsolo, passando por outra camada permeável, ou é coletado por tubos de drenagem e transportado até a rede de drenagem urbana.

2.9.2.3. Jardins de Chuva

Li e Zhao (2008) caracterizam o jardim de chuva como uma solução hidrológica eficiente e de baixo custo na paisagem, que requer manutenção mínima. Essa estrutura utiliza a interação entre solo, plantas e atmosfera para realizar processos de infiltração, retenção e adsorção, purificando e absorvendo águas pluviais de áreas reduzidas. Dessa forma, contribui para a diminuição do volume de escoamento e para a proteção das águas subterrâneas.

A principal função do jardim de chuva é projetada para captar, reter e retardar a água, minimizando ou eliminando os impactos causados pelo escoamento superficial. Durante esse processo, as águas são mantidas na superfície e posteriormente infiltradas no solo ou evaporadas.

Desta forma, contribuem para sua infiltração e retenção nos níveis freáticos em ambientes urbanos, amenizando impactos ocasionados pela impermeabilidade do solo nas cidades. São um tipo de biorretenção e resultam em melhoria da qualidade da água. São utilizados em áreas residenciais e comerciais, podendo ser utilizados para melhoria da água na agricultura (Miguez et al., 2018).

Figura 5 - Corte esquemático de jardim de chuva



Fonte: FCTH (2022)

Apresenta como vantagens de sua utilização além da redução do escoamento superficial, a recarga de reserva de águas subterrâneas, aumento de áreas verdes, paisagismo manutenção simples e investimentos baixos. No entanto,

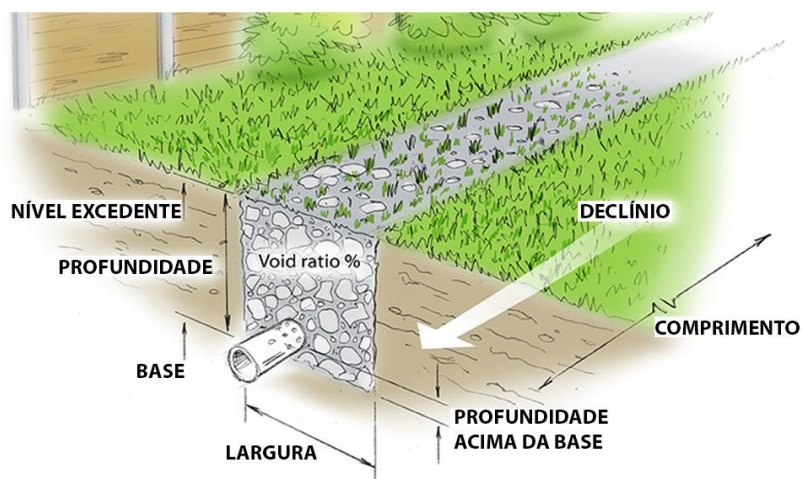
Miguez *et al.* (2018) aponta que tal ferramenta pode acarretar riscos de poluição às águas subterrâneas, além de que para sua implantação, dependem do tipo de solo e do nível do lençol freático.

2.9.2.4. Trincheiras de infiltração

Trincheiras de infiltração são valas permeáveis preenchidas com pedras, formando uma área de armazenamento para infiltração de águas pluviais. (USDoD, 2004). A abertura em uma direção perpendicular ao seu comprimento, possui largura e profundidade geralmente inferiores a 1 metro (Figura 5).

São facilmente adaptáveis aos locais de instalação, permitindo propor uma variedade de configurações, que as tornam indicadas para pequenas áreas urbanas (Prince George's County, 1999), indicadas para canteiros centrais e passeios, ao longo do sistema viário, ou ainda junto a estacionamentos, jardins, terrenos esportivos, etc.

Figura 6 - Corte esquemático de trincheira de infiltração



Fonte: LAUTEC (2020)

Apesar dessas vantagens, há a necessidade de manutenção periódica para o controle da colmatção e o risco de poluição do lençol freático. Apresentam restrições de seu emprego em áreas acentuadas (SÃO PAULO, 2012).

2.9.2.5. Valas de infiltração

As valas de infiltração representam uma técnica compensatória empregada na drenagem urbana. Elas são formadas por depressões linearmente escavadas no solo, com taludes inclinados, podendo ser preenchidas com agregado graúdo ou cobertas por vegetação. Essas estruturas facilitam a drenagem urbana ao promover a infiltração das águas pluviais ao longo de seu comprimento, contribuindo para a redução da velocidade do escoamento e a acumulação de água até que ocorra sua drenagem ou infiltração (Carvalho; Junior e Carvalho, 2012).

São adaptáveis a diferentes condições locais, podem ter projeto e traçado flexíveis, e são relativamente de baixo custo (USDOT, 1996). No entanto, áreas com declividade baixa ou média são mais apropriadas para a implantação desta técnica, haja vista o seu escoamento mais lento e maior capacidade de infiltração.

2.9.2.6. Microrreservatórios

Os microrreservatórios, também conhecidos como barril de chuva ou cisternas, são dispositivos que capturam e armazenam a água da chuva que escorre de telhados. Eles desempenham um papel importante na gestão de águas pluviais e na promoção da sustentabilidade hídrica, haja vista que promovem a reutilização da água captada. Verifica-se também o seu uso em regiões com déficit hídrico para armazenamento de volumes de água para abastecimento durante épocas de estiagem (Hammes; Ghisi; Thives, 2018)

São materiais de estruturas simples, em formas de caixas, semelhantes às utilizadas para abastecimento de água potável. Podem ser executadas em diversos tipos de materiais, por exemplo: concreto, alvenaria, fibras de vidro, polipropileno, ou outro material. Hidraulicamente, possuem uma estrutura de descarga junto ao fundo, trabalhando como orifício ou descarregador e um vertedor de emergência somente nas situações em que o evento de projeto é superado. Normalmente são enterrados, porém, se houver limitação de altura devido a rede de drenagem, podem ser aparentes e participar do projeto paisagístico do lote (Agra, 2001).

Figura 7 – Croqui de microrreservatório enterrado



Fonte: DRUMOND *et al.* (2013).

Sua função é reservar temporariamente a precipitação, retardando a velocidade de escoamento superficial, já que essa estrutura reservada para controle no manancial de águas pluviais, compensa a perda de capacidade de armazenamento do solo impermeável.

2.10. MODELAGEM COMPUTACIONAL

A modelagem computacional hidrológica é uma ferramenta fundamental para o entendimento e a gestão dos processos relacionados ao ciclo hidrológico, especialmente em regiões urbanas. De acordo com Chow *et al.* (1988), a ferramenta permite a simulação de eventos hidrológicos, como precipitação, escoamento superficial e infiltração, auxiliando na previsão de inundações e outros riscos associados.

Um exemplo amplamente utilizado é o HEC-HMS (Hydrologic Modeling System), que permite a simulação detalhada do escoamento superficial em resposta a eventos de chuva, ajudando a prever inundações e a projetar sistemas de drenagem eficientes. Outro modelo notável é o TOPMODEL (TOPography based hydrological MODEL), que se baseia na topografia da bacia para prever áreas onde o escoamento superficial é mais provável de ocorrer, sendo especialmente útil em regiões montanhosas e de relevo acentuado (Beven, 1979).

Esses modelos são essenciais não apenas para prever inundações, mas também para o planejamento urbano e a gestão de recursos hídricos. O SWAT (Soil and Water Assessment Tool), por exemplo, é um modelo que simula o escoamento superficial e outros processos hidrológicos em grandes bacias, permitindo a análise de diferentes cenários de uso do solo e práticas de manejo. Ele é frequentemente usado para avaliar o impacto de intervenções humanas no escoamento superficial e na qualidade da água (ARNOLD, 1998).

Da mesma forma, o VIC (Variable Infiltration Capacity), com sua abordagem semi-distribuída, permite a modelagem do escoamento superficial em grandes bacias, levando em conta a variabilidade espacial de parâmetros como infiltração e evapotranspiração.

Para meios urbanos destacam-se o modelo SWMM (Storm Water Management Model), um modelo dinâmico chuva-vazão para a gestão de drenagem urbana; o Mike URBAN, um modelo abrangente para abastecimento de água (que incorpora os softwares gratuito EPANET nesta tarefa) coleta de esgoto e águas pluviais (incorpora o SWMM5 nesta tarefa); e o HydroWORKS, modelo qualitativo para eventos de precipitação, também baseado no modelo SWMM (Butler & Davies, 2010).

Esses modelos, ao transmitir uma visão detalhada de como o escoamento ocorre em diferentes condições, são ferramentas indispensáveis para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de manejo da água. Seus resultados fornecem uma base científica sólida para a tomada de decisões, possibilitando que gestores e planejadores urbanos implementem medidas preventivas e corretivas com maior precisão, visando à mitigação dos impactos negativos decorrentes de eventos extremos.

2.10.1. SWMM

O *Storm Water Management Model* (SWMM) é um dos modelos hidrológicos mais amplamente utilizados em ambientes urbanos, particularmente para a gestão de águas pluviais. Desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), o SWMM é um modelo baseado em processos que permite a simulação detalhada do escoamento superficial, da infiltração e do transporte de poluentes em sistemas de drenagem urbanos (Rossman, 2015).

Ele oferece um ambiente integrado para a análise das interações entre a precipitação, o escoamento superficial e as estruturas de controle de águas pluviais. Assim, é capaz de representar uma variedade de condições de uso do solo, sistemas de drenagem e práticas de controle que são importantes para a gestão sustentável das águas pluviais.

Por ser um modelo hidrológico dinâmico que simula hidrogramas a partir de dados de entrada, ele pode determinar a quantidade de escoamento gerado em cada sub-bacia, a vazão, a profundidade do fluxo, a qualidade da água em cada tubulação ou canal, entre outros aspectos. O modelo é composto por diversos blocos que podem ser simulados separadamente (COLLODEL, 2009).

O bloco *Runoff* refere-se à transformação da chuva em vazão, enquanto o bloco *Transport* trata do transporte na rede de drenagem com base na onda cinemática. O bloco *Extran* realiza a modelagem hidrodinâmica em condutos e canais, e o bloco *Storage/Treatment* foca na qualidade das águas (Garcia e Paiva, 2006). O bloco *Statistics* é utilizado para registrar hidrogramas e polutogramas de eventos de chuva independentes, além de realizar cálculos estatísticos e análises de frequência (Smith, 1992).

Neste estudo, será utilizado o bloco *Runoff* do SWMM versão 5.1 para simular o escoamento superficial da área de estudo. Este gera hidrogramas a partir de dados meteorológicos, como chuva e evaporação de um conjunto de parâmetros. Esses parâmetros descrevem as características físicas (área, largura - *width*, inclinação - *slope*) e hidrológicas (percentual de área impermeável, armazenamento em depressão, coeficiente de rugosidade de Manning, e parâmetros de infiltração) da bacia.

A bacia hidrográfica pode ser representada como um conjunto de sub-bacias e canais interconectados (Carvalho, 2011), ou considerada como uma área concentrada. O usuário pode dividir a área de estudo em várias sub-bacias ou considerar a bacia como uma única área e identificar o ponto de saída da água (exutório). O escoamento superficial é obtido através de um reservatório não-linear para cada área ou sub-área, combinando as equações de Manning e de continuidade (Bastos, 2007).

O SWMM permite ao usuário escolher o nível de sofisticação desejado para resolver essas equações. Existem três modelos hidráulicos de transporte de água: o fluxo em regime uniforme, a onda cinemática e a onda dinâmica (Rossman, 2010).

Ele ainda oferece três modelos de infiltração: a Equação de Horton, o Método Green-Ampt e o modelo de infiltração baseado na Curva Número (CN) do Método *National Research Conservation Service* (NRCS), (Rossman, 2010). Para este estudo, foi utilizado o último modelo para simular o processo de infiltração e estimar o escoamento superficial da área de estudo, com o principal parâmetro de entrada sendo o número CN (Curva Número).

Diversos estudos demonstram a eficácia do SWMM na redução do escoamento superficial em áreas urbanas. Segundo Collodel (2009), o *software* permite a simulação precisa de hidrogramas em sub-bacias, possibilitando a identificação de áreas críticas para a intervenção com medidas de controle, como telhados verdes e microrreservatórios.

Garcia e Paiva (2006) também destacam a versatilidade do SWMM ao modelar sistemas de drenagem urbana com o objetivo de minimizar o impacto do escoamento superficial. Em suas análises, o modelo foi utilizado para simular a infiltração e o transporte de água em sistemas de drenagem complexos, resultando em uma diminuição expressiva do volume de escoamento. Esses autores ressaltam que a capacidade do SWMM de incorporar dados de qualidade da água, além de dados quantitativos, torna-o uma ferramenta abrangente para a gestão integrada de bacias hidrográficas urbanas.

Avaliando especificamente a aplicação do SWMM na redução do escoamento superficial, Bastos (2007) enfatiza a importância de ajustar os parâmetros hidrológicos do modelo para refletir com precisão as condições locais, como a rugosidade do solo e a porcentagem de áreas impermeáveis. O estudo de Bastos demonstra que, ao calibrar o modelo com dados locais, o SWMM pode prever com maior acurácia o comportamento do escoamento e auxiliar na implementação de práticas de gestão que visem à mitigação de inundações urbanas. O autor conclui que o uso do SWMM é essencial para a formulação de estratégias eficazes de drenagem urbana, especialmente em áreas suscetíveis a eventos de precipitação intensa.

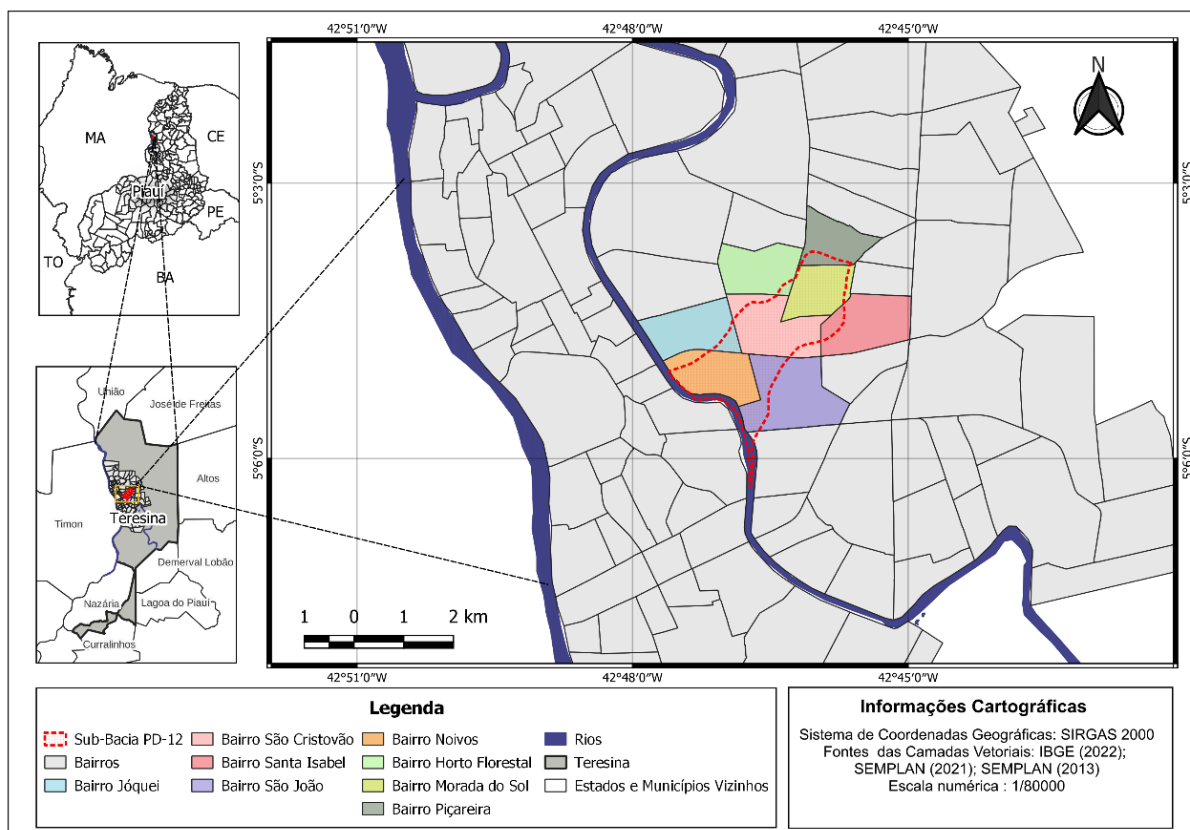
Diante do exposto, o SWMM é uma ferramenta indispensável para a modelagem e gestão de águas pluviais, proporcionando uma compreensão aprofundada dos impactos das práticas de controle e permitindo a criação de estratégias de drenagem mais eficientes, que promovem a sustentabilidade e a

resiliência das áreas urbanas, no tocante a melhorar do escoamento superficial e a redução de riscos hidrológicos.

3 ÁREA DE ESTUDO

A bacia selecionada para o estudo é a sub-bacia PD12, localizada na porção central da cidade de Teresina-PI, totalmente inserida no perímetro urbano municipal (Figura 7). Localizada na zona leste da cidade, a sub-bacia está inserida nos bairros Jóquei, São Cristóvão, Santa Isabel, São João, Noivos, Horto Florestal, Morada do Sol e Piçarreira.

Figura 8 – Localização da sub-bacia PD-12



Fonte: Autores (2023)

Topograficamente, o local possui pouca declividade, com cotas que variam dos 110 m, junto à cabeceira, aos 53 m, na foz (TERESINA, 2012). Essa situação favorece o aparecimento de pontos de alagamento, já que as águas precipitadas na região tendem a direcionar-se no sentido leste/oeste até chegar no rio Poti, passando por uma região altamente adensada, impermeabilizada na qual as ruas estreitas funcionam como uma espécie de “calha” de escoamento de águas pluviais.

A bacia é propícia a alagamentos, principalmente em torno do rio Poti na extensão da Av. Cajuína (Figura 9). A região ribeirinha é bastante plana e o extravasamento do rio é comum. Nesta sub-bacia está preservada a área de mata

ciliar com a implantação do Parque da Floresta Fóssil, o que justifica a ausência de áreas povoadas e que permite cumprir o papel de proteção para os períodos de cheias.

Figura 9 – Inundação da Avenida Cajuína, Noivos



Fonte: TERESINA (2012)

Na região da Av. João XXIII, seguindo para o norte até a Av. Senador Area Leão; e para leste até a Av. Presidente Kennedy, englobando toda a extensão de povoamento, tem-se frequentes alagamentos (Figura 10). A região concentra significativa declividade para a região central. O mesmo fenômeno é comum na Av. Dom Severino, entre a Av. Presidente Kennedy e Rua Jaime da Silveira. As regiões são de cota inferior em relação às vizinhanças, concentrando toda a água proveniente do escoamento.

Figura 10 – Alagamento na Avenida Pedro Almeida, São Cristóvão



Fonte: SUÊNIO (2020)

Por apresentar deficiência em apenas algumas ruas, não se estendendo por toda a região, infere-se que esses locais necessitam de microdrenagem, pois é sabido que nada em especial se tem construído para esses locais. As águas pluviais se acumulam a todo tempo dentro da sub-bacia e passam a escoar em grandes volumes superficialmente, extrapolando os limites das ruas. Deste modo, o trânsito fica prejudicado à mercê das limitações das rotas de deslocamento. Aos que arriscam transitar pela via alagada, ficam sujeitos a acidentes e até óbitos como ocorreu com uma servidora pública na Rua Eustáquio Portela em 2022 (Costa, 2022).

O sistema de drenagem da região atualmente não consegue absorver toda a água escoada dentro do tempo necessário para evitar alagamentos. A causa mais provável é a deficiência tanto nos sistemas de macrodrenagem quanto de microdrenagem, devido a problemas de dimensionamento e/ou ao entupimento das tubulações, que impedem a livre passagem da água. Isso é evidenciado pelo frequente e intenso alagamento de várias ruas, indicando a insuficiência desses sistemas.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Considerando as estratégias de procedimentos sustentáveis a serem estimulados pelo executivo municipal apreciados no plano diretor do município de Teresina, bem como o potencial limitado da disponibilidade de espaço para colocação de LID em áreas urbanas públicas, adotou-se a implantação dos dispositivos na escala de lotes residenciais a fim de avaliar a relação entre a aplicação de solução individual em espaços privados e as consequentes implicações a nível global da bacia estudada.

Dessa forma, considerando a maior aplicabilidade das ferramentas de baixo impacto, adotou-se dois tipos de práticas: telhado verde e microrreservatórios, no tocante a avaliar sua eficácia na mitigação do escoamento da bacia sob efeitos dos eventos de precipitação.

Para avaliar o desempenho dos dispositivos de baixo impacto, foram realizadas simulações computacionais das respostas hidrológicas e hidráulicas em diferentes cenários de precipitação.

Os dados necessários para a implementação dos modelos são dados meteorológicos, hidrológicos, topográfico e a delimitação urbanística da bacia em estudo. As características fisiográficas da área de estudo a serem utilizadas na modelagem foram extraídas do Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina (PDDUr) (TERESINA, 2012), indicando, dentre outros dados pertinentes ao modelo:

Tabela 1 – Características fisiográficas da bacia

Área da bacia	538,13 hectares (5,381 km ²)
Tempo de concentração	14,63 min
Área impermeável	69,7%
CN médio	88,46
Largura	7.293 m
Declividade	1,7%

Fonte: Autores (2024)

O Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina adotou a Equação 1 abaixo para a determinação das curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF), sendo apropriada para definir o hietograma do modelo chuva-razão para este estudo.

$$i = \frac{1194,273 \times T^{0,1738}}{(t+10)^{0,7457}}$$

(1)

Onde (i) é a intensidade da chuva em mm/h, (T) o período de retorno em anos e (t) é o tempo de concentração da bacia em minutos. O intervalo de tempo considerado para a discretização da chuva de projeto foi determinado em função do menor tempo de concentração encontrado para as sub-bacias existentes dentro da área modelada PD12.

Os resultados obtidos por simulação hidrológica são apresentados individualmente para cada um dos cenários. Nestes, utilizou-se a distribuição por blocos alternados e intervalos de tempo de dois minutos para precipitações de 120 minutos de duração. Assim, considerou-se o tempo de concentração de dois minutos, o tempo de recorrência de cinco anos e dez anos, e o tempo de observação do evento chuvoso de duas horas.

4.1. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Para comparar a eficiência dos dispositivos de baixo impacto nos sistemas de drenagem urbana da bacia de estudo frente a eventos extremos de precipitação, foram definidas configurações específicas de áreas e dispositivos, organizadas em duas situações distintas.

A Situação 01 (cenário 1), considera a estrutura real da bacia sem a implementação dos dispositivos de baixo impacto, a fim de estabelecer os valores de referência para comparação nos demais cenários. A situação 02 considera a implementação de dispositivos unitários de baixo impacto nas áreas e lotes máximos existentes para implementação dos LIDs, relativo à sua natureza de locação, a fim de obter a eficiência unitária máxima possível dos dispositivos na bacia de estudo. Dessa forma, nesta situação de análise será subdividido em 7 cenários específicos que dizem respeito aos elementos utilizados para a situação descrita:

- Cenário 2: Estrutura real da bacia com a implementação de 100% de telhados verdes nas áreas residenciais;
- Cenário 3: Estrutura real da bacia com a implementação de 50% de telhados verdes nas áreas residenciais;
- Cenário 4: Estrutura real da bacia com a implementação de 25% de telhados verdes nas áreas residenciais;

- Cenário 5: Estrutura real da bacia com a implementação de 100% de Microrreservatórios nos lotes residenciais;
- Cenário 6: Estrutura real da bacia com a implementação de 50% de Microrreservatórios nos lotes residenciais;
- Cenário 7: Estrutura real da bacia com a implementação de 25% de Microrreservatórios nos lotes residenciais.

Dessa forma, para os cenários propostos foram realizadas 14 modelagens no total, visto que foram considerados as simulações em 02 diferentes eventos de precipitação, sendo o tempo de retorno de 5 e 10 anos.

4.2. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DAS LIDS

De posse dessas características, o modelo no SWMM foi dimensionado e submetido a eventos de chuva com TR de 5 e 10 anos. Os parâmetros de entrada na sub-bacia PD12 e a quantificação dessa área ocorreu por meio do uso dos programas computacionais Google Earth, Autodesk e QGIS Desktop.

A metodologia de vetorização de telhados utilizando o QGIS para delimitação de área de telhados e contagem da unidade de lotes pode ser descrita em etapas organizadas e detalhadas, com o uso de imagens aéreas de Teresina coletadas em abril de 2013, com resolução espacial de 0,10 metros, que permitiu um nível elevado de precisão.

Inicialmente, as imagens aéreas são importadas para o QGIS, garantindo o correto georreferenciamento para que cada elemento na imagem esteja posicionado com precisão em relação ao espaço físico real. Esse georreferenciamento é essencial para que a vetorização e a análise espacial resultem em dados que possam ser utilizados de forma confiável para planejamento urbano e ambiental.

Na etapa de vetorização, realizou-se manualmente o delineamento do contorno de cada telhado visível nas imagens. Essa vetorização manual é feita com as ferramentas de edição do QGIS, que permitiram criar polígonos ao redor dos telhados com precisão. A alta resolução das imagens de 0,10 metros facilitou a identificação detalhada dos contornos dos telhados, mesmo em áreas urbanas mais densas.

Cada polígono de telhado foi associado a uma tabela de atributos, onde foram registradas informações detalhadas, facilitando a obtenção dos valores exatos para cada telhado. Esses valores somados, permitiram quantificar em um mapa temático (Apêndice 1) a área total e telhados em 69,70 hectares, cerca de 12,95% da área total da sub-bacia PD12 (538,16 ha).

Assim, a modelagem dos telhados verdes limitou-se à criação de cenários com área de cobertura por telhados verdes de 100%, 50% e 25%, e então avaliou-se a interferência do percentual da LID no pico e volume de escoamento da bacia analisada. Da área total de telhados encontrada que corresponde a 100% de telhados verdes, 34,85 ha corresponde à 50% da área de telhados verdes e para 25% de telhados verdes, uma área de 17,43 ha.

Finalmente, com a camada vetorizada e os dados de área e quantidade de telhados por lote, foi possível fazer a contagem dos lotes que possuem cobertura. A efetiva implantação dessa medida considerou um microrreservatório por lote, totalizando 3.989 unidades (Apêndice 2), correspondendo um cenário de 100% dessa ferramenta implantada. Dessa totalidade, 1.995 unidades correspondem a 50% e 998 unidades de microrreservatórios correspondem a 25%.

Para a modelagem dos telhados verdes, optou-se por utilizar telhados com 15 cm de substrato para este estudo, considerando que essa espessura seria eficaz no controle do escoamento superficial, além de se mostrar adequado para a área de estudo, levando em conta o clima típico da região, a preservação da estrutura original dos telhados e a baixa exigência de manutenção para os usuários. Considerou-se a captação da máxima da área de telhados e do microrreservatório, que foram modelados com o volume de 1000 litros por unidade de lote.

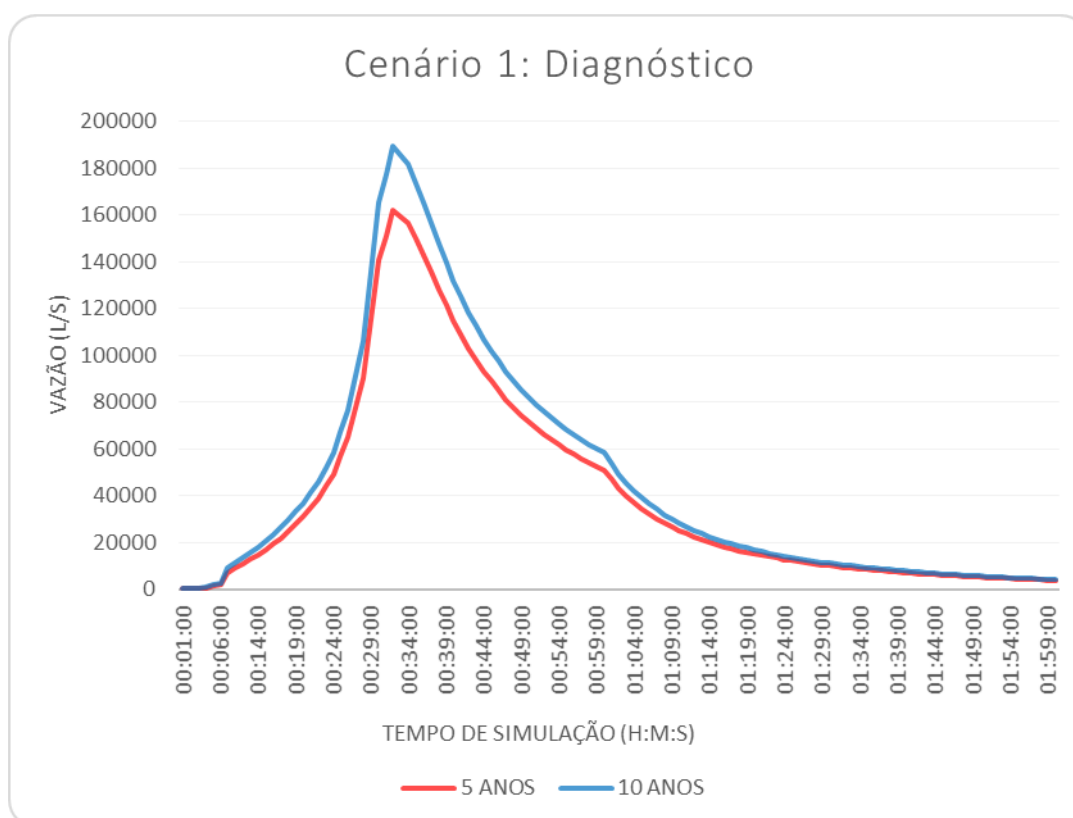
Para análise do escoamento superficial e do volume escoado no exutório da sub-bacia, foram gerados os hidrogramas e o volume de escoamento superficial no cenário diagnóstico e, posteriormente, com as LIDs implementadas, considerando um cenário de intervenção com a LID tratando 100%, 50% e 25% das LIDs implantadas na bacia nos tempos de retorno de 5 e 10 anos, respectivamente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. CENÁRIO 1: DIAGNÓSTICO

De acordo com os parâmetros iniciais adotados, foram obtidos os valores de vazões escoados para os dois tempos de retorno (5 e 10 anos). Nessa situação, a sub-bacia PD12 foi analisada sem a implantação de estruturas LIDs e é possível perceber o impacto com as altas vazões de pico devido à impermeabilização. O início do escoamento superficial acontece no primeiro minuto de simulação em ambos os períodos. Conforme Figura 10, para a TR-5 anos, o pico na vazão de escoamento foi de 161.886,3 L/s, sendo o volume total escoado na saída da sub-bacia igual a 279.670.990,00 L. Enquanto para a TR-10 anos, o pico de vazão tem o valor de 189.477,5 L/s, compreendendo um volume total de escoamento igual a 322.761.460,00 L. Em ambas as situações, a vazão de pico ocorre 32 minutos após o início da precipitação.

Figura 11 – Hidrograma no cenário diagnóstico



Fonte: Autores (2024)

5.2. CENÁRIO 2: 100 % DE TELHADOS VERDES

Para os cenários em que 100% da área de telhados é tratada por telhados verdes, obteve-se os resultados sob precipitação com TR-5 anos para o pico de vazão na simulação em 132.512 L/s, sendo o volume total escoado na saída da sub-bacia igual a 258.628.930,00 L, o que significa uma redução de 7,52% comparando com o respectivo diagnóstico.

Já para TR-10 anos, o pico de vazão foi de 155.689,4 L/s, com volume de escoado na saída da sub-bacia de 300.960.600,00 L, representando uma redução de 6,75% levando em conta a situação inicial. Para ambas as situações, a vazão de pico ocorre 32 minutos após o início da precipitação.

5.3. CENÁRIO 3: 50 % DE TELHADOS VERDES

Com 50% de tratamento de telhados verdes sob a precipitação com TR-5 anos, o pico de vazão na simulação tem o valor de 147.414,4 L/s aos 32 minutos, sendo o volume total escoado na saída da sub-bacia igual a 268.466.500,00 L, o que significa uma redução de 4,01% comparando com o cenário diagnóstico inicial.

Para TR-10 anos, o pico de vazão foi de 172.783,2 L/s também aos 32 minutos, com volume de escoado na saída da sub-bacia de 311.147.970,00 L, representando uma redução de 3,6% levando em conta a situação inicial.

5.4. CENÁRIO 4: 25 % DE TELHADOS VERDES

A bacia apresentou no TR-5 anos vazão de pico máxima aos 32 minutos, com 154.739,7 L/s e volume escoado 273.912.680,00 L. Representa uma melhora de 2,06% em relação ao diagnóstico inicial. Para TR-10 anos, o pico de vazão foi de 181.222,6 L/s aos 32 minutos, com volume de escoado na saída da sub-bacia de 316.787.880,00 L, correspondendo a uma queda de 1,85% com o diagnóstico sem LIDs.

Os quadros 3 e 4 abaixo expõem um resumo dos resultados das métricas adotadas para o cenário diagnóstico e as simulações dos cenários de telhados verdes separados por tempo de retorno:

Quadro 1 – Resultados das simulações para o Telhado Verde TR=5 anos

MÉTRICA	TEMPO DE RETORNO - 5 ANOS									
	SEM LID (m³)	TV 25 (m³)	TV 50 (m³)	TV 100 (m³)	MELHORIA 25 (m³)	MELHORIA 25 (%)	MELHORIA 50 (m³)	MELHORIA 50 (%)	MELHORIA 100 (m³)	MELHORIA 100 (%)
PERDA POR INFILTRAÇÃO	50.161,89	52.728,92	55.005,33	58.740,16	2.567,02	5,12	4.843,44	9,66	8.578,27	17,10
ESCOAMENTO SUPERFICIAL	279.670,99	273.912,68	268.466,50	258.628,93	- 5.758,31	-2,06	- 11.204,49	-4,01	- 21.042,06	-7,52
ARM. FINAL DA BACIA	28.430,99	32.865,43	37.283,72	45.856,61	4.434,44	15,60	8.852,73	31,14	17.425,62	61,29

Fonte: Autores (2024)

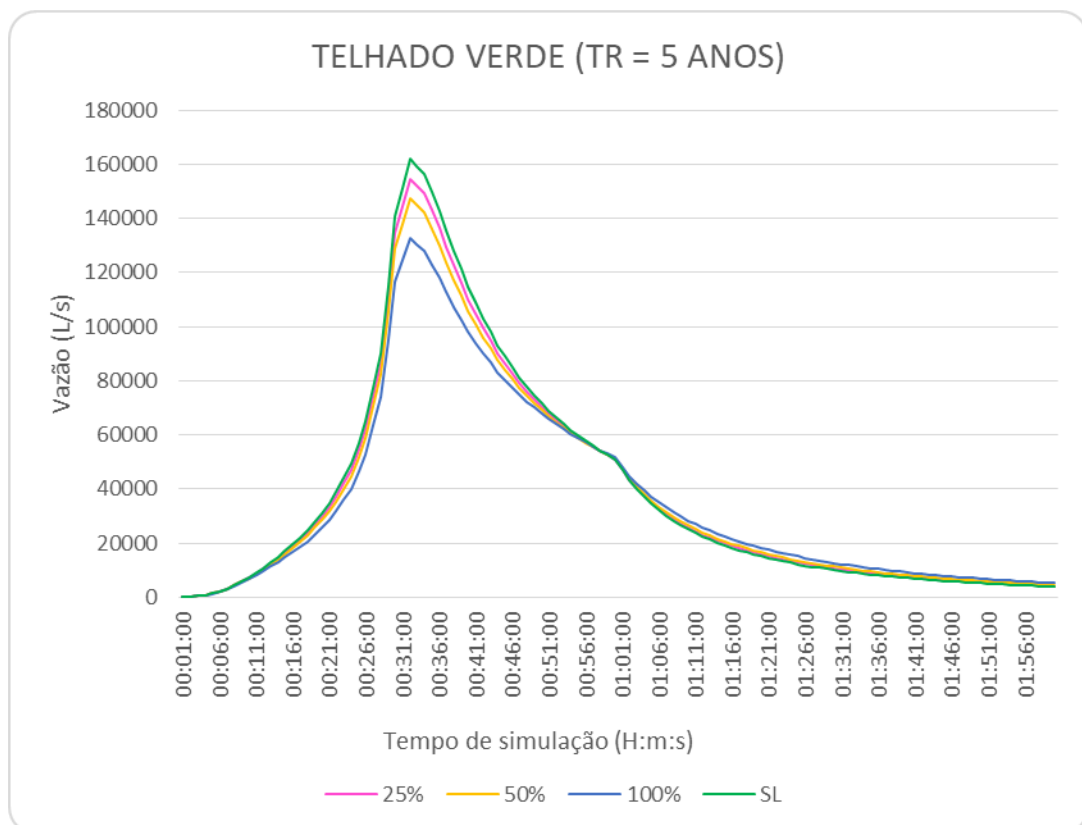
Quadro 2 – Resultados das simulações para o Telhado Verde TR=10 anos

MÉTRICA	TEMPO DE RETORNO - 10 ANOS									
	SEM LID (m³)	TV 25 (m³)	TV 50 (m³)	TV 100 (m³)	MELHORIA 25 (m³)	MELHORIA 25 (%)	MELHORIA 50 (m³)	MELHORIA 50 (%)	MELHORIA 100 (m³)	MELHORIA 100 (%)
PERDA POR INFILTRAÇÃO	51.722,56	54.370,30	56.711,30	60.564,53	2.647,75	5,12	4.988,74	9,65	8.841,97	17,09
ESCOAMENTO SUPERFICIAL	322.761,46	316.787,88	311.147,97	300.960,60	- 5.973,58	-1,85	- 11.613,49	-3,60	- 21.800,86	-6,75
ARM. FINAL DA BACIA	29.711,81	34.280,79	38.828,24	47.632,54	4.568,98	15,38	9.116,43	30,68	17.920,73	60,32

Fonte: Autores (2024)

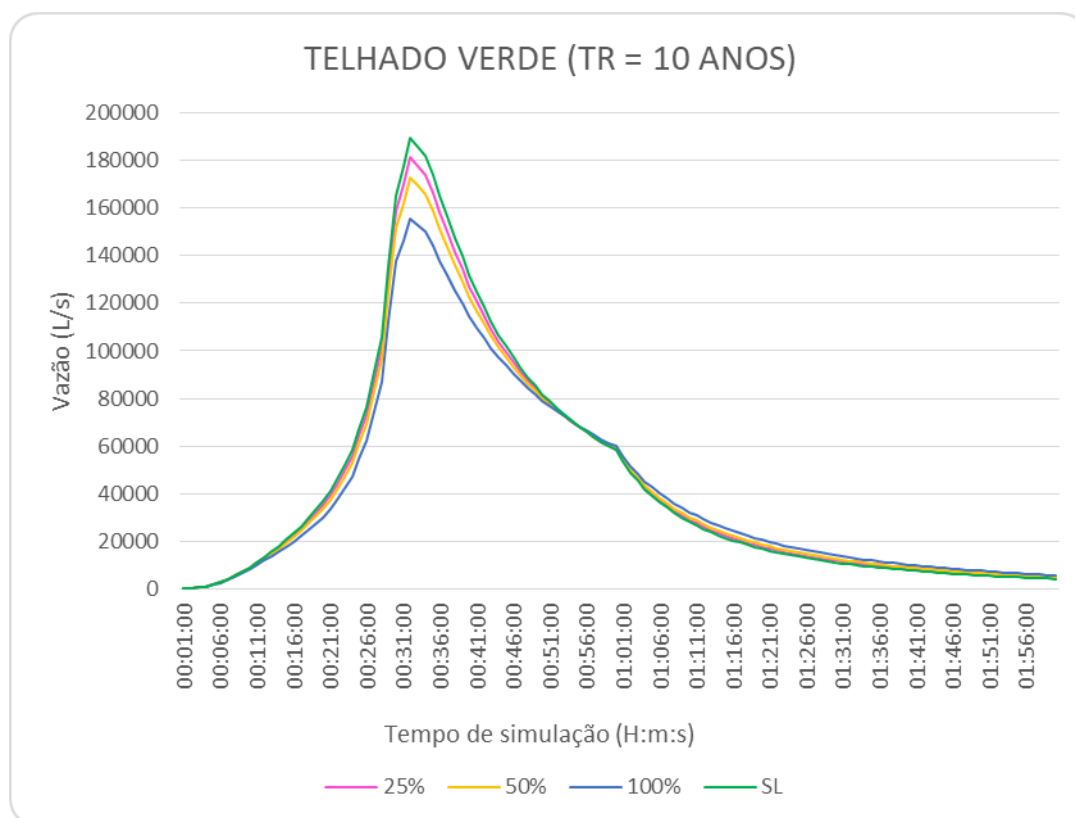
De maneira geral, os cenários simulados considerando a aplicação de telhados verdes na bacia PD12 apresentaram desempenho de controle de escoamento e armazenamento da precipitação superior àquele obtido pela simulação sem a utilização de tais ferramentas, conforme pode ser visto nos gráficos das Figuras 11 e 12.

Figura 12 – Hidrogramas de desempenho dos Telhados Verdes TR = 5 anos



Fonte: Autores (2024)

Figura 13 - Hidrogramas de desempenho dos Telhados Verdes TR = 10 anos



Fonte: Autores (2024)

Analisando as perdas por infiltração do terreno, observa-se que todos os cenários simulados com a LID promoveram maior infiltração da água no solo do que as condições normais. A modelagem do dispositivo facilita, nesse caso, que, após sua capacidade de armazenamento ser superada, o excesso de água seja direcionado de volta para áreas capazes de absorvê-la, promovendo a infiltração. As melhorias nos tempos de retorno estudadas são bem similares em ambos cenários, indicando um impacto positivo na implementação da tecnologia na sub-bacia.

No quesito redução do escoamento superficial, todas as simulações, mesmo que modesta, apresentaram melhora no terreno, com reduções variando entre 2,06% e 7,52% no tempo de retorno de 5 anos, e 1,85% a 6,75% no tempo de retorno de 10 anos. Isso indica que menos água esco superficialmente na bacia hidrográfica, contribuindo para a redução de erosão e falhas nos dispositivos de drenagem.

O aumento do armazenamento final de água em cerca de 60% para ambos os tempos de retorno a um cenário de 100% de telhados verde, indica que mais

água foi retida na bacia hidrográfica. Isso significa que, com a implantação generalizada de telhados verdes, uma parcela maior da água das chuvas é retida localmente, em vez de ser rapidamente escoada para rios e cursos d'água.

Esse armazenamento adicional de água nas camadas de solo dos telhados verdes resulta em menos água disponível para escoar superficialmente, o que, por sua vez, diminui o risco de inundações e sobrecarga dos sistemas de drenagem.

A aplicação de telhados verdes em áreas urbanas tem mostrado resultados expressivos na gestão hídrica e no desenvolvimento sustentável das cidades. Pesquisas como de Palla, Nunes e Canholi reforçam a eficácia desses sistemas em reduzir o escoamento superficial, mitigar as ilhas de calor urbanas, melhorar a qualidade do ar e promover benefícios econômicos, ambientais e sociais.

Segundo Palla et al. (2008), os telhados verdes são capazes de deter significativamente o escoamento pluvial. Usando também o SWMM e inserindo os telhados verdes em 10% dos telhados existentes na bacia, obteve-se 5% de redução na vazão de pico; enquanto que para 100% de substituição por telhados verdes, a vazão de pico reduziu para 51%.

Nunes et al. (2017) simularam três sub-bacias da bacia do rio Morto, nas quais houve 100% de substituição dos telhados convencionais por telhados verdes e obtiveram redução da vazão de pico de até 11,1%. O cenário com a inserção de telhados verdes de forma conjunta nas sub-bacias levou à redução da vazão de pico no exutório da bacia do rio Morto da ordem de 1%. De acordo com os mesmos autores, o impacto da implantação de telhados verdes na redução do escoamento superficial local teria benefícios significativos para a população das áreas densamente ocupadas, sobretudo em espaços que não contam com redes de infraestrutura urbana.

Canholi (2015) ressalta que, em cenários de longo prazo, os telhados verdes contribuem para a resiliência das cidades frente às mudanças climáticas. A capacidade desses sistemas de amortecer os efeitos de eventos climáticos extremos, como chuvas intensas, torna as áreas urbanas mais adaptáveis às variações climáticas, promovendo a sustentabilidade hídrica. A replicação desses sistemas em outras áreas urbanas, conforme sugerido por Miguez et al. (2018), pode ajudar a construir um modelo de gestão hídrica mais sustentável, que prioriza a adaptação contínua e a preservação dos recursos naturais.

Os benefícios econômicos e operacionais dos telhados verdes são amplamente documentados na literatura. Saiz et al. (2011) mostram que, apesar dos custos iniciais de instalação, os telhados verdes proporcionam uma significativa economia ao longo do tempo. A redução no consumo de energia, devido ao isolamento térmico proporcionado pela vegetação, resulta em economias substanciais nas despesas com aquecimento e refrigeração. Além disso, a maior durabilidade dos telhados verdes em comparação com os telhados convencionais, como destacado por Canholi (2015), reduz os custos de manutenção e substituição.

A análise dos benefícios econômicos e operacionais dos telhados verdes, especialmente em comparação com as placas fotovoltaicas no quesito refrigeração, tem sido destaque em estudos recentes. Telhados verdes contribuem para a redução da temperatura interna dos edifícios por meio do efeito de evapotranspiração das plantas, o que ajuda a mitigar o consumo de energia associado ao ar-condicionado.

Isso é particularmente vantajoso em climas quentes, pois reduz o efeito de ilhas de calor urbano e diminui os picos de temperatura. Já em edifícios com placas fotovoltaicas, a integração de vegetação pode diminuir a temperatura dos painéis em até 8 °C, otimizando a eficiência e prolongando a vida útil dos módulos solares (Alonso-Marroquin e Qadir, 2023).

Em termos de custo-benefício, os telhados verdes têm vantagens relacionadas à retenção de água da chuva e ao isolamento térmico, o que pode compensar parcialmente o custo inicial mais elevado em comparação com as placas solares convencionais, que geram energia diretamente. A combinação de ambos é estudada como uma solução bio-solar, com resultados promissores para economizar energia e maximizar a eficiência dos painéis solares por meio do resfriamento natural proporcionado pela vegetação (Tronchin et al., 2023).

5.5. CENÁRIO 5: 100% DE MICRORRESERVATÓRIOS

Na implementação de microrreservatórios na sub-bacia PD12 sob precipitação com TR-5 anos, o pico de vazão na simulação tem o valor de 135.436,2 L/s, sendo o volume total escoado na saída da sub-bacia igual a 271.404.850,00 L, o que significa uma redução de 2,96% comparando com o diagnóstico inicial. Já para TR-10 anos, o pico de vazão foi de 160.049,4 L/s, com volume de escoado na

saída da sub-bacia de 314.538.380,00 L, representando uma melhoria de 2,55% no escoamento inicial. Para ambas as situações, o pico da vazão aconteceu aos 32 minutos de precipitação.

5.6. CENÁRIO 6: 50% DE MICRORRESERVATÓRIOS

Com a implantação de 50% de Microrreservatórios sob a precipitação com TR-5 anos, o pico de vazão na simulação tem o valor de 148.595,3 L/s aos 32 minutos, sendo o volume total escoado na saída da sub-bacia igual a 275.317.270,00 L, o que significa uma redução de 1,56% comparado ao cenário diagnóstico inicial.

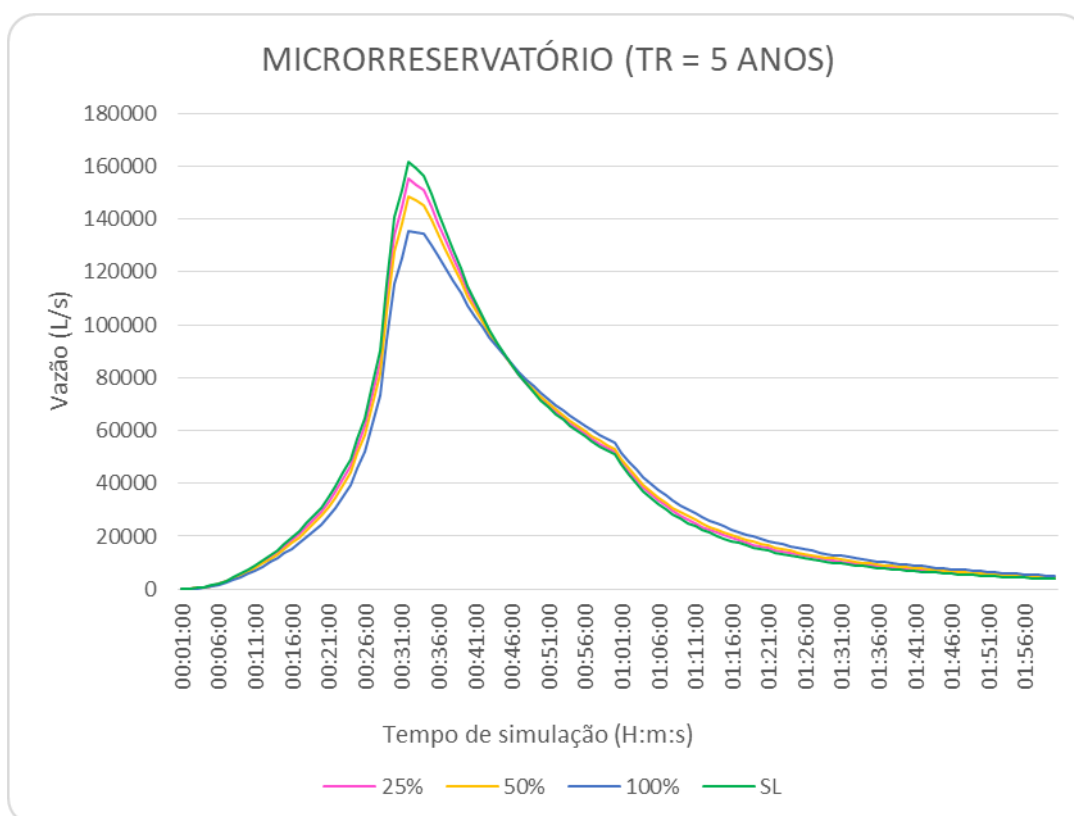
Para TR-10 anos, o pico de vazão foi de 174.671,6 L/s também aos 32 minutos, com volume de escoado na saída da sub-bacia de 318.456.180,00 L, representando uma redução de 1,33% levando em conta a situação inicial.

5.7. CENÁRIO 7: 25% DE MICRORRESERVATÓRIOS

Para os cenários em que 25% da área de telhados é tratada por microrreservatórios, a implementação da LID sub-bacia PD12 sob precipitação com TR-5 anos, o pico de vazão na simulação tem o valor de 155.229,8 L/s, sendo o volume total escoado na saída da sub-bacia igual a 277.437.620,00 L, o que significa uma redução de 0,8% comparando com o respectivo diagnóstico. Já para TR-10 anos, o pico de vazão foi de 182.057,5 L/s, com volume de escoado na saída da sub-bacia de 320.555.000,00 L, representando uma redução de 0,68% levando em conta a situação inicial. Para ambas as situações, a vazão de pico ocorre 32 minutos após o início da precipitação.

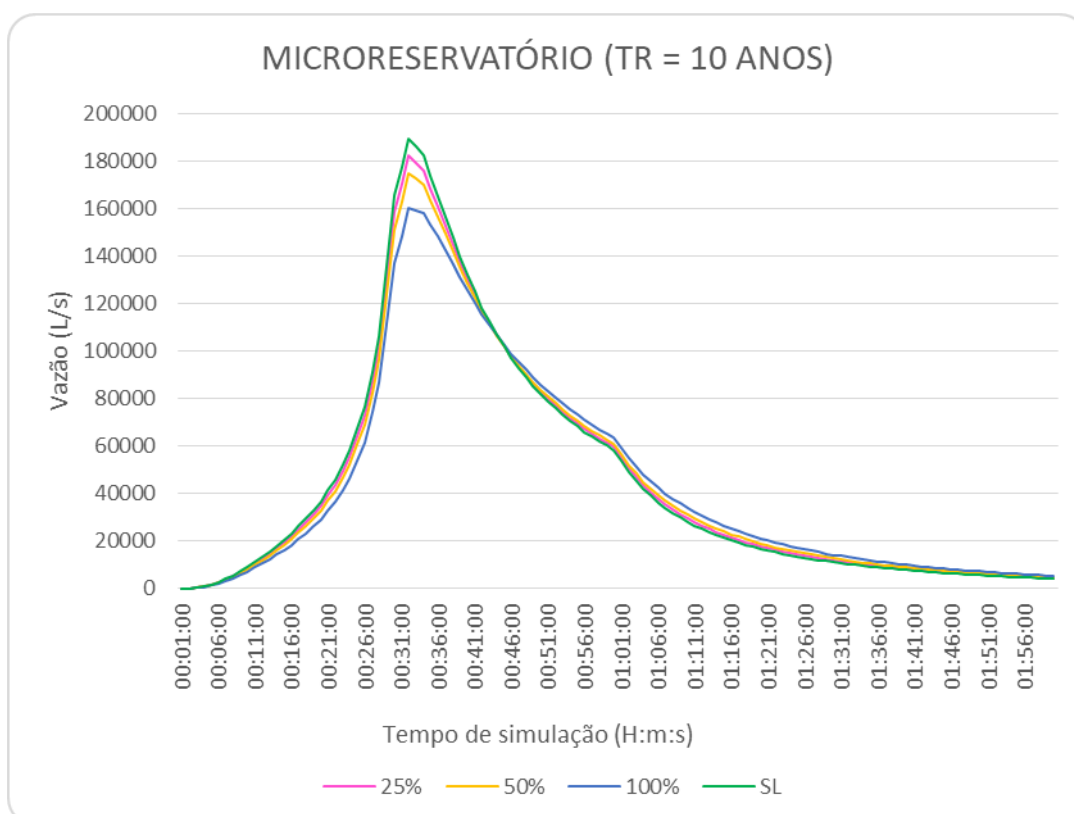
Para uma comparação mais ampla, as figuras abaixo mostram os resultados dos hidrogramas para um tempo de retorno de 5 e 10 anos, com o cenário diagnóstico e todos os cenários de implementação dos microrreservatórios.

Figura 14 - Hidrogramas de desempenho dos Microrreservatórios TR = 5 anos



Fonte: Autores (2024)

Figura 15 - Hidrogramas de desempenho dos Microrreservatórios TR = 10 anos



Fonte: Autores (2024)

Os quadros 5 e 6 abaixo apresentam o resumo dos resultados das métricas adotadas para o cenário diagnóstico e as simulações dos cenários da instalação de Microrreservatórios separados por tempo de retorno:

Quadro 3 – Resultados das simulações para o microrreservatório TR=5 anos

TEMPO DE RETORNO - 5 ANOS										
MÉTRICA	SEM LID (m³)	MR 25 (m³)	MR 50 (m³)	MR 100 (m³)	MELHORIA 25 (m³)	MELHORIA 25 (%)	MELHORIA 50 (m³)	MELHORIA 50 (%)	MELHORIA 100 (m³)	MELHORIA 100 (%)
PERDA POR INFILTRAÇÃO	50.161,89	50.156,51	50.145,75	50.124,22	- 5,38	-0,01	- 16,14	-0,03	- 37,67	-0,08
ESCOAMENTO SUPERFICIAL	279.670,99	277.437,62	275.317,27	271.404,85	- 2.233,36	-0,80	- 4.353,71	-1,56	- 8.266,14	-2,96
ARM. FINAL DA BACIA	28.430,99	30.696,65	32.843,90	36.863,96	2.265,65	7,97	4.412,91	15,52	8.432,97	29,66

Fonte: Autores (2024)

Quadro 4 - Resultados das simulações para o microrreservatório TR=10 anos

TEMPO DE RETORNO - 10 ANOS										
MÉTRICA	SEM LID (m³)	MR 25 (m³)	MR 50 (m³)	MR 100 (m³)	MELHORIA 25 (m³)	MELHORIA 25 (%)	MELHORIA 50 (m³)	MELHORIA 50 (%)	MELHORIA 100 (m³)	MELHORIA 100 (%)
PERDA POR INFILTRAÇÃO	51.722,56	51.711,79	51.701,03	51.684,89	- 10,76	-0,02	- 21,53	-0,04	- 37,67	-0,07
ESCOAMENTO SUPERFICIAL	322.761,46	320.555,00	318.456,18	314.538,38	- 2.206,46	-0,68	- 4.305,28	-1,33	- 8.223,08	-2,55
ARM. FINAL DA BACIA	29.711,81	31.955,94	34.087,05	38.069,44	2.244,13	7,55	4.375,24	14,73	8.357,62	28,13

Fonte: Autores (2024)

Diante do desfecho das simulações, que indicam uma melhoria mínima na infiltração e redução do escoamento superficial com a implementação de microrreservatórios, é fundamental explorar esses resultados de forma crítica e contextualizada.

Os resultados obtidos na pesquisa, que apontaram uma melhoria variando de 0,01% a 0,08% para TR = 5 anos e 0,02% a 0,07% para TR = 10 anos, sugerem que, embora essa ferramenta de baixo impacto seja reconhecida por seu potencial de mitigação de escoamentos, sua eficácia pode ser limitada em determinados contextos, especialmente em áreas urbanas com alta densidade de construção e em cenários de precipitação extrema.

Uma pesquisa conduzida por Zhang et. al. (2015) na cidade de Toronto, Canadá, demonstrou que a instalação de microrreservatórios em 100% dos lotes de uma bacia hidrográfica urbana poderia reduzir o volume total de escoamento em até 60%, dependendo do tamanho do barril e da frequência das precipitações. O estudo concluiu que a implementação em larga escala de microrreservatórios pode ser uma estratégia eficaz para mitigar os impactos das enchentes urbanas.

A sub-bacia PD-12, uma das maiores de Teresina, apresenta área de 538,16 hectares, sendo 336,08 hectares de área impermeável, representando 62,45%. Com uma configuração urbanística caracterizada pela predominância de prédios

comerciais e poucas residências, totaliza 69,70 hectares de área de telhados, contemplando 3.989 unidades de lotes (microrreservatórios).

Tal fato pode ter sido o motivo do impacto mínimo da melhoria da LID em relação à perda por infiltração e ao escoamento superficial, já que a sub-bacia foi contemplada com unidades insuficientes de instalação de microrreservatórios, devido à pouca quantidade de lotes e grande quantidade de área impermeável.

Outro motivo que justifique a pouca eficiência dessa LID abordada de maneira isolada se deve à capacidade de captação de águas pluviais através do volume estimado em 1000 litros para todos os lotes. Esse volume limitado não considera adequadamente a variabilidade da área dos lotes, fator essencial para dimensionar a quantidade de água que precisa ser armazenada ou retida em função da área impermeável de cada propriedade.

Como resultado, essa subestimação compromete o desempenho dos sistemas de drenagem, visto que uma abordagem padronizada desconsidera diferenças na capacidade de infiltração e de escoamento entre lotes de diferentes tamanhos e configurações.

Os microrreservatórios, por definição, possuem uma capacidade limitada de armazenamento de água da chuva, o que os torna mais adequados para gerenciar escoamentos de pequena a média intensidade. Canholi (2015) discute que a eficácia das LIDs é altamente dependente da escala de implementação e da distribuição espacial adequada dentro da bacia hidrográfica. Em casos onde a densidade de microrreservatórios não é suficiente, como possivelmente observado nesta pesquisa, a capacidade coletiva de redução do escoamento é irrisória, o que explicaria a modesta melhoria observada.

Outro fator importante a ser considerado é a influência das condições locais, incluindo o tipo de solo, a cobertura vegetal e a intensidade das chuvas. Estudos de Miguez et al. (2018) indicam que, em áreas urbanas densamente impermeabilizadas, a eficácia dos microrreservatórios pode ser comprometida, uma vez que a infiltração de água no solo é reduzida.

Ademais, em cenários de mudanças climáticas, com eventos de precipitação cada vez mais intensos e frequentes, a eficácia desses dispositivos pode ser ainda mais limitada, conforme discutido por Fletcher *et al.* (2013), que ressaltam a necessidade de integrar soluções de maior escala ou combinadas com outras estratégias de gestão hídrica.

Em se tratando do armazenamento final de água na bacia para o cenário de 100% da LID implantada em ambos TR, tem-se uma melhoria de 30%, indicando um volume de água armazenado de aproximadamente 8.500 m³. Santos et al. (2019) discutem a relevância dos sistemas de retenção de água para promover a sustentabilidade urbana. Eles destacam que microrreservatórios, como os sistemas de armazenamento e uso de águas pluviais, são fundamentais para reduzir a demanda sobre fontes de água potável e melhorar a resiliência das cidades frente às mudanças climáticas.

Friedrich et al. (2020) ressaltam que a instalação de microrreservatórios pode reduzir significativamente os custos associados à captação e tratamento de águas pluviais. Segundo eles, ao armazenar e utilizar águas pluviais localmente, as cidades podem diminuir a necessidade de sistemas complexos de infraestrutura para gerenciamento de águas, resultando em economia financeira e operacional.

A literatura sugere que LIDs como os microrreservatórios são mais eficazes quando combinadas com outras estratégias de controle do escoamento. Tassoulas et al. (2012) enfatizam que a eficácia das LIDs depende de sua integração em um sistema de drenagem sustentável, onde cada componente contribui cumulativamente para a redução do escoamento e a mitigação dos riscos hidrológicos.

No entanto, para promover a sustentabilidade e mitigar os efeitos de enchentes em áreas urbanas, é essencial um planejamento urbano cuidadoso, que evite a ocupação de regiões naturalmente propensas a alagamentos. Esses locais têm papéis importantes no equilíbrio ambiental, pois abrigam ecossistemas que dependem dos ciclos naturais de inundação para manter sua biodiversidade e funcionalidade ecológica. Quando são ocupados por construções o desvio desses alagamentos compromete esses ecossistemas, afetando, por exemplo, a reprodução de espécies aquáticas e o fornecimento de nutrientes no solo.

A adoção de telhados verdes e microrreservatórios surge como uma solução sustentável em áreas urbanas para reduzir o impacto das chuvas e promover o manejo eficiente da água. Telhados verdes, com suas camadas de vegetação, ajudam a reter parte das águas pluviais, reduzindo o volume de escoamento superficial e aliviando a carga sobre os sistemas de drenagem urbanos. microrreservatórios, por sua vez, capturam e armazenam a água da chuva, podendo

liberar gradualmente essa água no solo ou ser usada para fins como irrigação, minimizando a sobrecarga das redes de drenagem e prevenindo enchentes locais.

Esse modelo de infraestrutura verde contribui para a manutenção dos níveis de umidade do solo e ajuda a regular o microclima, ao mesmo tempo em que preserva os ciclos hidrológicos naturais. Como afirmam Bhatta et al. (2010), um planejamento urbano eficaz é fundamental para a criação de cidades resilientes, que conseguem se adaptar e mitigar os impactos das mudanças climáticas. Assim, ao adotar um planejamento urbano sustentável que integra LIDs como telhados verdes e microrreservatórios, as cidades podem não apenas reduzir os riscos de alagamentos e enchentes, mas também proteger os ecossistemas naturais, garantindo que continuem a desempenhar suas funções essenciais sem serem ameaçados pela expansão urbana.

6 CONCLUSÃO

A presente pesquisa evidencia a importância da gestão de riscos hidrológicos para a cidade de Teresina, considerando seu histórico de urbanização desordenada e os impactos negativos associados à impermeabilização do solo. A impermeabilização pode ser considerada uma vulnerabilidade local da bacia, pois é um dos fatores determinantes para a ocorrência de eventos críticos. Na região central da bacia, onde se veem poucas áreas livres, é comum observar, em períodos de chuvas intensas, a formação de áreas alagadas. Isso ocorre devido ao sistema de drenagem ser antigo, que para os volumes atuais, encontra-se subdimensionado.

A implementação da tecnologia de telhados verdes teve um impacto positivo na gestão das águas pluviais da sub-bacia em estudo, aumentando a infiltração e o armazenamento de água, ao mesmo tempo em que reduziu o volume de escoamento superficial. Essa perspectiva demonstra a eficácia dos telhados verdes como uma metodologia de manejo sustentável das águas pluviais em ambientes urbanos.

Além disso, a implementação de microrreservatórios, embora limitada pela predominância de áreas comerciais, contribuiu para a captação e reutilização das águas pluviais, aliviando a pressão sobre o sistema de drenagem durante eventos de chuvas intensas. No entanto, a pesquisa mostrou que sua implementação de maneira isolada não é suficiente para atender às necessidades da sub-bacia PD-12, tendo em vista que a mesma apresenta área consideravelmente maior que a dos telhados calculados para as unidades da ferramenta modeladas.

Para melhorar a eficácia das LIDs nas sub-bacias de Teresina e contribuir para uma gestão de riscos mais robusta, é crucial adotar algumas medidas estratégicas. Em primeiro lugar, deve-se promover políticas públicas que incentivem a instalação de ferramentas de baixo impacto. A revisão do plano diretor da cidade pode incluir diretrizes que exijam a incorporação dessas práticas em novos projetos de construção, fortalecendo normativas que promovam a sustentabilidade, criando passos essenciais para a construção de uma cidade mais resiliente.

Outro ponto de destaque é o comportamento da população frente às vulnerabilidades decorrentes das mudanças climáticas e eventos hidrológicos. É necessário fomentar uma cultura de conscientização e envolvimento comunitário,

onde os moradores e gestores públicos compreendam a importância de práticas sustentáveis e participem ativamente na implementação de soluções que visem à mitigação de riscos.

O produto final deste trabalho, o Guia de Boas Práticas em Drenagem Urbana Sustentável, não se limita a ser apenas um documento técnico. Ele é concebido como uma ferramenta prática para órgãos públicos e comunidades, oferecendo diretrizes claras e adaptadas ao contexto de Teresina. Além de servir como um auxílio na tomada de decisões. O guia busca incentivar uma mudança cultural em direção a uma gestão mais integrada e sustentável dos riscos hidrológicos, promovendo o bem-estar da população e a proteção ambiental.

Em síntese, a simulação feita para uma microbacia urbana de Teresina, integrando telhados verdes e microrreservatórios em sua infraestrutura urbana, reforça a viabilidade e a eficácia dessas estratégias de baixo impacto, ao mesmo tempo em que ressalta a importância de um planejamento urbano que considere as especificidades locais e envolva a participação ativa de todos os atores sociais.

A análise detalhada da sub-bacia PD12, utilizando o software Storm Water Management Model (SWMM), associado às literaturas explanadas demonstra que a implementação de LIDs, como telhados verdes e microrreservatórios, proporciona benefícios nos âmbitos, operacional e ambiental. Isso porque os telhados verdes contribui para a regulação térmica das edificações, o que contribui para a eficiência energética e reduz os custos associados ao controle de temperatura. Além disso, os telhados verdes promovem a biodiversidade local e melhoram a qualidade do ar, proporcionando um ambiente urbano mais sustentável e resiliente frente às mudanças climáticas.

Os microreservatórios, além de reterem parte do volume de águas pluviais para controlar o escoamento, permitem a captação e o armazenamento dessa água para usos posteriores, como irrigação de áreas verdes e limpeza de áreas externas. Essa reutilização reduz a demanda por água potável, aliviando a pressão sobre os sistemas de abastecimento público e contribuindo para uma gestão hídrica mais eficiente.

Ao oferecer uma fonte alternativa de água, os microreservatórios ajudam a diminuir o consumo de recursos hídricos e promovem práticas mais sustentáveis, principalmente em períodos de estiagem ou escassez hídrica. Dessa forma, eles

não só melhoram a resiliência do sistema de drenagem, mas também promovem o uso racional da água no ambiente urbano.

Destaca-se a importância de que novos estudos sejam realizados para avaliar a eficiência dos telhados verdes e microrreservatórios no contexto do atual crescimento urbano. Os estudos aqui apresentados basearam-se no plano de drenagem urbana de Teresina de 2012 e nas imagens aéreas disponíveis à época. Assim, a expansão urbana desde então e as mudanças no uso e ocupação do solo podem alterar significativamente o comportamento hidrológico da área, impactando os resultados obtidos em estudos passados.

Dessa forma, é crucial que futuras pesquisas reavaliem esses sistemas de drenagem compensatória à luz das condições urbanas contemporâneas, visando uma gestão mais eficaz e adaptada ao cenário atual.

A experiência da modelagem na bacia PD12 na cidade de Teresina demonstra o potencial replicável das LIDs em outras regiões urbanas, criando um modelo de gestão hídrica que não apenas responde às necessidades atuais, mas também se adapta às condições futuras.

REFERÊNCIAS

- AGRA, S. G. **Estudo experimental de microrreservatórios para controle do escoamento superficial**. 2001. 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- AHIABLAME, L. M.; ENGEL, B. A.; CHAUBEY, I. (2012) **Effectiveness of Low Impact Development Practices: literature review and suggestions for future research**. *Water Air Soil Pollnt*, n. 223, p. 4253-73, jun.
- ALEXANDER, D. **Principles of Emergency Planning and Management**. Oxford: Oxford University Press, 2002.
- ALONSO-MARROQUIN, F.; QADIR, M. **Energy-efficient building envelopes: Green roofs and photovoltaic integration for urban cooling**. *Renewable Energy and Sustainable Urban Development*, 2023. Doi: <https://doi.org/10.3390/en16135184>
- ANSCHAU, A. R.; RECKZIEGEL, T.; SILVEIRA, F.; MACHADO, F. M.; AMARAL, F. G. **Avaliação da Expansão Urbana e seu Impacto na Dinâmica de Escoamento Superficial da Bacia Hidrográfica do Arroio Itaquarinchim de Santo Ângelo – RS**. *Revista Engevista*, v. 20, n. 5, p. 772-791, 2018.
- ARNOLD, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). **Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development**. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
- AZEVEDO, L. F. Com prejuízo superior a R\$ 3 bilhões na agricultura, RS terá de recuperar 3,2 milhões de hectares de terra. **O GLOBO**, Rio de Janeiro, 06/06/2024. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/sos-rio-grande-do-sul/noticia/2024/06/06/com-prejuizo-superior-a-r-3-bilhoes-na-agricultura-rs-tera-de-recuperar-32-milhoes-de-hectares-de-terra.ghtml>. Acesso em 08 de ago. de 2024.
- BACH, P. M., Rauch, W., Mikkelsen, P. S., McCarthy, D. T., & Deletic, A. (2013). **A Critical Review of Integrated Urban Water Modelling – Urban Drainage and Beyond**. *Environmental Modelling & Software*, 47, 88-103.
- BAHIENSE, J. M. (2013) **Avaliação de Técnicas compensatórias em drenagem urbana baseadas no conceito de desenvolvimento de baixo impacto, com o apoio de modelagem matemática**. Dissertação (mestrado), UFRJ/Coppe/Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro. 135 p.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. Belo Horizonte ABRH, 2005. 266p.
- BASTOS, A. R. **Dinâmica de escoamento e modelagem hidrológica**. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 22, n. 4, p. 408-419, 2007.

BEVEN, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). **A physically based, variable contributing area model of basin hydrology**. Hydrological Sciences Journal, 24(1), 43-69.

BEVILACQUA, P.; MAZZEO, D.; ARCURI, N. Thermal inertia assessment of an experimental extensive green roof in summer conditions. Building and Environment, v. 131, p. 264-276, 2018.

BIRKMANN, J. **Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies**. United Nations University Press, 2013).

BRASIL (2001) Lei Federal nº 10.257, de 10 de julho de 2001. **Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/LEIS/LEIS_2001/L10257.htm#:~:text=Lei%20municipal%20definir%C3%A1%20os%20empreendimentos,cargo%20do%20Poder%20P%C3%ABlico%20municipal. Acesso em 10 ago. 2024.

BRASIL. (2007) Lei Federal nº 11.445 de 2007. **Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências**. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2007/lei-11445-5-janeiro-2007-549031-publicacaooriginal-64311-pl.html>. Acesso em 08 ago. 2024
BRASIL. (2009) Ministério da Integração Nacional, Secretaria Nacional de Defesa Civil. **Glossário da Defesa Civil – Estudos de Riscos e Medicina dos Desastres**. 5ª ed., Brasília, DF.

BRASIL. (2012) Lei Federal nº 12.608 de 10 de abril de 2012. **Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nºs 12.340, de 1º de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. **Caderno Técnico de Gestão Integrada de Riscos Hidrológicos (GIRD +10)**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2021.

BRASIL. Portaria Nº 3.646, de 20 de dezembro de 2022. **Altera a Portaria MDR n. 260, de 2 de fevereiro de 2022**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, Ed. 239, p. 90. 21 dez. 2022. Seção 1.

BUTLER, D., & Davies, J. W. (2010). **Urban drainage** (2nd ed.). Spon Press.

CANHOLI, A.P., 2005. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos. 304 p.

CANHOLI, A.P., 2015. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2ª EDIÇÃO AMPLIADA E atualizada. São Paulo: Oficina de Textos. 384 p.

CARDONA, O. D.. **The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: A necessary review and criticism for effective risk management**. In: BANKOFF, G.; FRERKS, G.; HILHORST, D. (Eds.). *Mapping Vulnerability: Disasters, Development, and People*. London: Earthscan, 2003. p. 25-37.

CARDOSO, A. **Sistemas Urbanos de Drenagem**, disponível no site http://wiki.urca.br/dcc/lib/exe/fetch.php?media=apostila_de_drenagem_urbana_do_prof_cardoso_netto.pdf. Acesso em: 02 set. 2023.

CARVALHO. J. C, JUNIOR . G.F.N.G.; CARVALHO.E.T.L. **Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais** /, organizadores. – Brasília: Faculdade de Tecnologia, 2012. 644 p

CASTLETON, H. F., STOVIN, V., Beck, S. B. M., & Davison, J. B. (2010). "Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit." *Energy and Buildings*, 42(10), 1582-1591.

CEMADEN. CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS. Missão, 20 de janeiro de 2016. Disponível em: <<http://www2.cemaden.gov.br/missao-do-cemaden/>>. Acesso em: 21 de jan de 2022.

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM DESASTRES, CEPED/RS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Capacitação em Gestão de Riscos**. 2 ed. Porto Alegre: CEPED/UFRGS, 2016.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). **Applied Hydrology**. McGraw-Hill.

CIRIA. **The SuDS Manual**. Escrito por Woods-Ballard, B. et al. London, UK: CIRIA. 2015.

COLLODEL, José C. **Modelo hidrológico para simulação de escoamento superficial**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, n. 3, p. 322-331, 2009.

COSTA, C. **Motorista desaparece após carro ser arrastado pela água da chuva na zona leste de Teresina**. g1PI, 05/02/2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/pi/piaui/noticia/2022/02/07/professora-que-morreu-apos-carro-ser-arrastado-pela-agua-da-chuva-e-sepultada-e-recebe-homenagens-em-teresina.ghtml>. Acesso em: 08 ago. de 2024.

CUTTER, S. L., et al. **Social vulnerability to environmental hazards**. Social Science Quarterly, vol. 84, 2003, pp. 242-261

CUTTER, S. L.; ASH, K. D.; EMRICH, C. T. **The Geographies of Community Disaster Resilience**. Global Environmental Change, v. 29, p. 65-77, 2014.

DRUMOND, P. P., COELHO, M. M. L. P., MOURA, P. M. (2013b) **Avaliação do Funcionamento de um Microrreservatório com o Volume Exigido pela Legislação de Belo Horizonte**. In Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Bento Gonçalves, Nov. 2013.

DVORAK, B., & VOLDER, A. (2010). "Green roof vegetation for North American ecoregions: A literature review." *Landscape and Urban Planning*, 96(4), 197-213.

ECOTECNOLOGIAS. **Foto grátis telhado verde**. 2020. 1 fotografia. 508x327 pixels. Disponível em <http://ecotecnologias.org/wp-content/uploads/2020/10/Imagem1.png> Acesso em: 03 set. 2023.

FCTH. **Foto grátis jardim de chuva**. 2022. 1 fotografia. 464x261 pixels. Disponível em https://cdn.shopify.com/s/files/1/0073/8269/6034/f.../corte-jardim-de-chuva_1024x1024.jpg?v=1598043723. Acesso em: 03 set. 2023.

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., ... & Viklander, M. (2013). **SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage**. Urban Water Journal, 10(3), 152-170. DOI: 10.1080/1573062X.2012.756133.

FRIEDRICH, K., & LEHMANN, D. (2015). **Hydrological risk assessment and management of urban areas: Case study and guidelines**. *Water Resources Management*, vol. 29, no. 11, pp. 4051-4066.

G. Di Baldassarre, H. Kreibich, S. Vorogushyn, J. Aerts, K. Arnbjerg-Nielsen, M. Barendrecht, P. Bates, M. Borga, W. Botzen, P. Bubeck, B. De Marchi, M. Carmen Llasat, M. Mazzoleni, D. Molinari, E. Mondino, J. Mård, O. Petrucci, A. Scolobig, A. Viglione, P.J. Ward. **An interdisciplinary research agenda to explore the unintended consequences of structural flood protection**, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22,5629–5637., <https://doi.org/10.5194/hess-22-5629-2018>, 2018.

GARCIÁ, José M.; PAIVA, Roberto M. **Gestão e qualidade da água em sistemas de drenagem**. Revista de Engenharia Civil, v. 28, n. 1, p. 55-68, 2006.

GIRÃO, Ítalo R. F.; RABELO, Daniel R.; ZANELLA, Marcia E. **Análise teórica dos conceitos: Riscos Socioambientais, Vulnerabilidade e Suscetibilidade**. Revista de Geociências do Nordeste, [S. l.], v. 4, p. 71–83, 2018. DOI: 10.21680/2446-1395.2018v4n1.

HAMMES, G.; GHISI, E.; THIVES, L.P. **Application of stormwater collected from porous asphalt pavements for non-potable uses in buildings**. Journal of Environmental Management, v. 222, p. 338–347, 2018.

JEFFERS, M. **Low Impact Development Strategies for Urban Flood Control.** Water Research, v. 188, p. 116-123, 2022.

JOBIM, M. L. de M. **Infraestrutura verde urbana: estratégias para o controle ambiental urbano e sua aplicabilidade na cidade de Porto Alegre.** Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

KOURTIS, I.; TSIHRINTZIS, V.; BALTAS, E. Simulation of Low Impact Development (LID) Practices and Comparison with Conventional Drainage Solutions. **Proceedings**, 2018.

LAUTEC, H. **Resilient Cities: The Importance of Climate Change Adaptation.** Cham: Springer, 2020

LI, J. Q.; ZHAO, W. W. **Design and Hydrologic Estimation Method of Multi-Purpose Rain Garden: Beijing case study.** In: INTERNATIONAL LOW IMPACT DEVELOPMENT CONFERENCE, Seattle, 2008. **Proceedings...** Seattle, 2008.

LIAO, K. H.; LEIN, H.; JOHNSON, S.; MERKURYEVA, G. **Planning for Resilience: Climate Adaptation and Urban Flood Management.** Journal of Environmental Planning and Management, v. 58, n. 7, p. 1161-1181, 2015.

MARCELINO, EV Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos. São José dos Campos: INPE, 2008 MIGUEZ, M. G.; Gregório, L. T.; VERÓL, A. P. **Gestão de riscos e desastres hidrológicos.** 1.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

MARCHEZINI, V.; LONDE, L. R.; BERNARDES, T.; CONCEICAO, R. S.; SANTOS, E. V.; SAITO, S. M.; SOLER, L.; SILVA, A. E. P.; BORTOLETTO, K. C.; MEDEIROS, M. D.; GONCALVES, D. **Sistema de alerta de risco de desastres no Brasil: desafios à redução da vulnerabilidade institucional In: Reduction of vulnerability to disasters: from know ledge to action.** 1 ed. São Carlos: Rima Editora, 2017a, v.1, p. 287-310.

MIGUEZ, M.; VERÓL, A.; DI GREGORIO, L.T. **Gestão de riscos e desastres hidrológicos.** Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2018.

NUNES, D. M; FONSECA, P. L; SILVA, L. P. (2017). "Avaliação do papel dos telhados verdes no desenho e desenvolvimento urbano de baixo impacto ambiental e no controle de enchentes na cidade do Rio de Janeiro". Labor e Engenharia, Campinas, SP, v. 11, n. 3, p. 374-393, jul. /set. 2017.

O'BRIEN, K., et al. **Toward a sustainable and resilient future.** Global Environmental Change, vol. 16, 2006, pp. 253-267.

OBERNDORFER, E.; RYBCZYNSKI, D.; PFEIFER, D. et al. **Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services.** BioScience, v. 57, n. 10, p. 823-833, 2007.

PALLA, A; BERRETA, L. G; LANZA, L. G; BARBERA, P. (2008). **“Modelling storm water control operated by green roofs at the urban catchment scale”**. 11^a Conferência Internacional de Drenagem Urbana.

PAZWASH, Hormoz. **Urban Storm Water Management**. 2 ed. Londres/Nova York: CRC Press, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1201/b19658>. eBook ISBN 9781482298956.

PEDUZZI, P; DAO, H; HEROLD, C. **Mapping disastrous, natural hazards using global datasets**. Natural Hazards, v. 35, p. 265-289, 2005

PITTA, Márcio Rocha. **Projeto de juntas em pavimentos rodoviários de concreto**. 6. ed. São Paulo: ABCP, 1998a.

PRINCE GEORGE'S COUNTRY – MARYLAND (1999). **Low-Impact Development Design Strategies: An Integrated Design Approach**. Maryland: Department of Environmental Resources. 150 p. (Disponível em <https://www.princegeorgescountymd.gov/DocumentCenter/View/86/Low-Impact-Development-Design-Strategies-PDF>).

RECONSTRUÇÃO DO RIO GRANDE DO SUL VAI CUSTAR PELO MENOS R\$ 19 BILHÕES, DIZ LEITE. **O GLOBO**, Rio de Janeiro, 09/05/2024. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/sos-rio-grande-do-sul/noticia/2024/05/09/reconstrucao-do-rio-grande-do-sul-vai-custar-r-19-bilhoes-diz-leite.ghtml>. Acesso em: 08 ago. de 2024.

RIBEIRO, A M. **BMP's em drenagem urbana: aplicabilidade em cidades brasileiras**. São Paulo, 2014. 104p.

RODRIGUES, R. M.; SILVA, M. J.; MENEZES FILHO, J. R. **Urban Hydrological Risks: An Integrated Management Approach**. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 193, n. 8, p. 486, 2021

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model User's Manual**. EPA/600/R-05/040, Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 2010.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1**. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, 2015.

SAIZ, J. M. (2011). **Urban Flood Risk Management: A Case Study in Barcelona**. *Journal of Flood Risk Management*, vol. 4, no. 2, pp. 150-162.

SANTOS, M. A., et al. **Gestão sustentável da água em áreas urbanas: A importância dos sistemas de retenção**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 24, no. 3, 2019, pp. 523-535).

SÃO PAULO (cidade) (2012) Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. **Manual de Drenagem e manejo de águas pluviais: aspectos tecnológicos; fundamentos**. São Paulo: SMDU, 2012.

SECRETARIA DE COMUNICAÇÃO. **Situação nos Municípios**, Porto Alegre, 10/07/2024. Disponível em: <https://sosenchentes.rs.gov.br/situacao-nos-municipios>. Acesso em: 08 ago. de 2024.

SILVA-SÁNCHEZ, S.; JACOBI, P. R. Políticas de recuperação de rios urbanos na cidade de São Paulo: possibilidades e desafios. *Estudos Urbanos e Regionais*, v. 14, n. 2, p. 121-145, 2012. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/321/32120263006.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2024

SMITH, B. **Statistical methods in hydrology**. Journal of Hydrology, v. 147, n. 3, p. 203-220, 1992.

SOVIĆ KRŽIĆ, A. Nature-Based Solutions for Flood Mitigation and Resilience in Urban Areas. Springer, 2020.

SUÊNIO, B. **Chuva alaga ruas e causa transtornos na zona leste de Teresina**. 2020. Disponível em: <https://www.gp1.com.br/pi/piaui/noticia/2020/2/5/chuva-alaga-ruas-e-causa-transtornos-na-zona-leste-de-teresina-471315.html>. Acesso em: 10 ago. de 2024.

TASSI, R.; MAINIER, F. B.; SOUZA, M. B. **Benefícios da utilização de coberturas verdes para o conforto térmico**. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 1, n. 2, p. 26-34, 2014.

TAVANTI, D.R. **Desenvolvimento de Baixo Impacto aplicado ao processo de planejamento urbano**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

TERESINA. Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação Geral. **Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina. Relatório Final**, 2012.

TERESINA. **Lei nº 5.481, de 20 de dezembro de 2019**. Dispõe sobre o Plano Diretor de Teresina, denominado “Plano Diretor de Ordenamento Territorial - PDOT”, e dá outras providências. Disponível em: <https://semplan.teresina.pi.gov.br/wp-content/uploads/sites/39/2020/07/Lei-n%C2%BA-5.481-2019-29-06-2020.pdf>. Acesso em: 2 set. 2023.

TIERNEY, K. RODRÍGUEZ, H.; QUARANTELLI, E. L.; DYNES, R. R. **Disaster Preparedness and Resilience: Current and Future Trends**. Handbook of Disaster Research. New York: Springer, 2019. p. 3-19.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. 1ª. ed. v. 01. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.196p. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutogeologico/> . Acesso em: 03 de set. 2023.

TRONCHIN, L.; et al. **Comprehensive Review of the Advancements, Benefits, Challenges, and Design Integration of Energy-Efficient Materials for**

Sustainable Buildings. *Sustainability*, 2023. Doi: <https://doi.org/10.3390/buildings14092994>

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**. 4º ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2014.

UNITED STATES. U.S. Department Of Transportation. **Office of Aviation and International Economics. The Low Cost Airline Service Revolution**. Washington, DC, 1996. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/471932>. Acesso em: 03 set. 2023.

USDoD – UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE (2004) **Unified Facilities Criteria (UFC)** Design: Low Impact Development Manual, USA.

US EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTALPROTECTIONAGENCY (2000) **Low Impact Development – A Literature Review**. EPA-841-B-00-005. Washington, DC: Office of Watter.

VARGAS, H. R. A. Guía Municipal para la Gestión del Riesgo. Banco Mundial. **Programa de Reducción de la vulnerabilidade fiscal del Estado frente a Desastres Naturales**. Republica de Colombia. Bogotá, 2010.

WANG, Y. **Sustainable Urban Drainage Systems: A Comprehensive Review**. *Environmental Science & Technology*, v. 56, n. 5, p. 2975-2984, 2022.

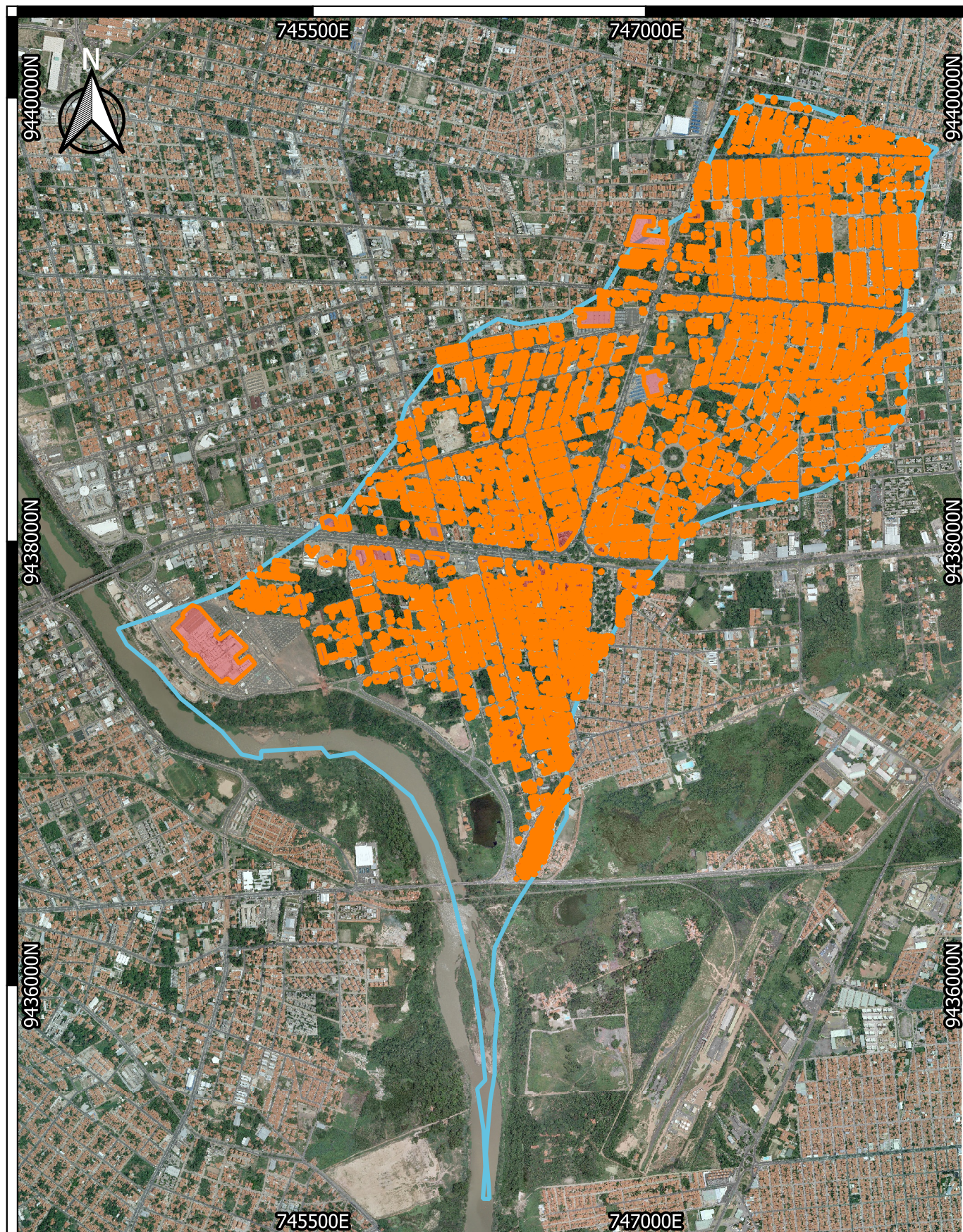
WARD, P. J.; BOER, J.; AGARWAL, A.; SINGH, R. A **Systematic analysis of systems approach and flood risk management research: trends, gaps, and opportunities**. *International Journal of Disaster Risk Science*, v. 11, n. 3, p. 300-315, 2020. DOI: 10.1007/s13753-020-00300-7.

WHITE, G.F. (1945). **Human Adjustment to Floods. A Geographical Approach to the Flood Problem in the United States**. In: **Chicago**, T.U.O., Ed., Research Paper No. 29, The University of Chicago, Chicago.

WISNER, Ben. BLAIKIE, Piers; CANNON, Terry; DAVIS, Ian. **At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters**. 2nd ed. London: Routledge, 2004. eBook. Disponível em: <https://doi.org/10.4324/9780203714775>. Acesso em: 10 ago. 2024.

WOODS-BALLARD, B. et al. **The SuDS Manual**. 5. ed. London: CIRIA, 2015.

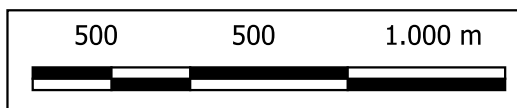
ZHANG, X., Huang, G., Yu, H., & Wang, X. (2015). **Assessment of Rainwater Harvesting for Urban Flood Control in Toronto, Canada**. *Journal of Environmental Management*, 153, 45-53.



Área de telhados na Sub-Bacia PD 12 do município de Teresina - PI

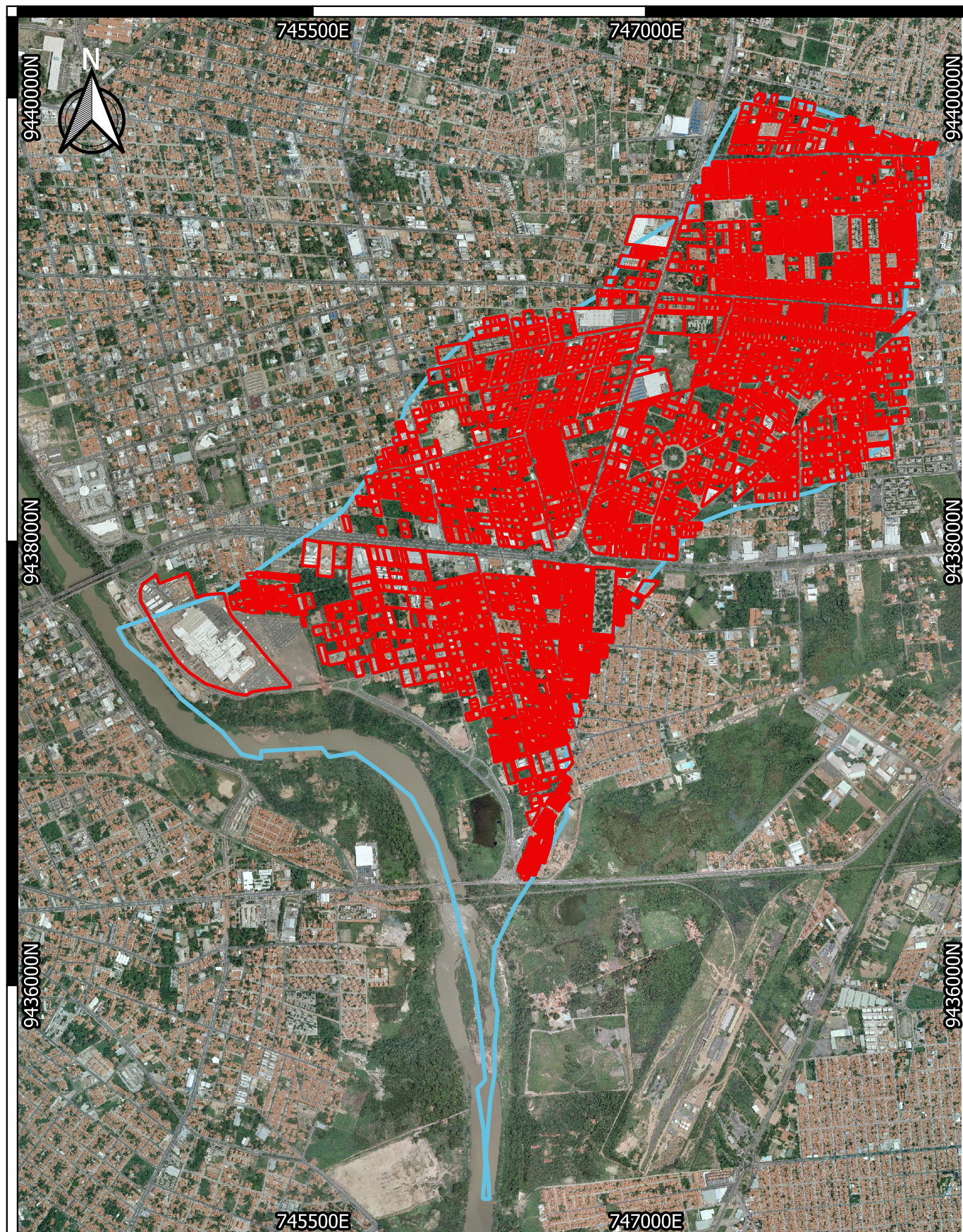
Legenda

- Telhados
- Sub-Bacia PD 12



Informações Técnicas

Ortofotocarta levantamento aerofotogramétrico.
 Data: Abril/2013
 Sistema Geodésico Brasileiro : SIRGAS2000
 Coordenadas Planas: UTM FUSO 23S
 Meridiano Central: 45 W
 Escala Gráfica: 1/2400
 Área de Telhados: 696.861,835 m²

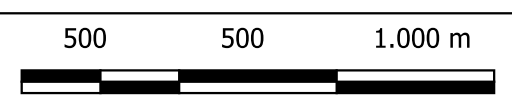


Quantidade de Lotes na Sub-Bacia PD 12 do município de Teresina - PI

Legenda

Lotes

Sub-Bacia PD 12



Informações Técnicas

Ortofotocarta levantamento aerofotogramétrico.

Data: Abril/2013

Sistema Geodésico Brasileiro : SIRGAS2000

Coordenadas Planas: UTM FUSO 23S

Meridiano Central: 45 W

Escala Gráfica: 1/2400

Quantidade de Lotes: 3.989 lotes