



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades



Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

PEDRO LUIZ LANZILLOTTA DA FONSECA

**RESILIÊNCIA URBANA ASSOCIADA AOS SISTEMAS DE
DRENAGEM SUSTENTÁVEIS: TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS EM
MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS**

Bauru
2023



PEDRO LUIZ LANZILLOTTA DA FONSECA

**RESILIÊNCIA URBANA ASSOCIADA AOS SISTEMAS DE
DRENAGEM SUSTENTÁVEIS: TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS EM
MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo B. Moruzzi
Coorientador: Prof. Dr. Jorge Manuel G. P. Isidoro

Bauru
2023



ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE PEDRO LUIZ LANZILLOTTA DA FONSECA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 03 dias do mês de fevereiro do ano de 2023, às 14:00 horas, no(a) Via sistemas de videoconferência e outras ferramentas para comunicação a distância, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de PEDRO LUIZ LANZILLOTTA DA FONSECA, intitulada **RESILIÊNCIA URBANA ASSOCIADA AOS SISTEMAS DE DRENAGEM SUSTENTÁVEIS: TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS EM MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. RODRIGO BRAGA MORUZZI (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento DEPLAN / Instituto de Geociencias e Ciencias Exatas IGCE de Rio Claro – UNESP, Prof. Dr. ALFREDO AKIRA OHNUMA JÚNIOR (Participação Virtual) do(a) Departamento. de Eng. Sanitária e Meio Ambiente / Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, Prof. Dr. ELSON ANTONIO DO NASCIMENTO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal Fluminense - UFF. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado _ _ _ _ _ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. RODRIGO BRAGA MORUZZI

F676r

Fonseca, Pedro Luiz Lanzillotta da
Resiliência Urbana Associada aos Sistemas de Drenagem Sustentáveis:
Técnicas Compensatórias em Manejo de Águas Pluviais / Pedro Luiz
Lanzillotta da Fonseca. -- Bauru, 2023
84 f. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Rodrigo Braga Moruzzi

Coorientador: Jorge Manuel Guieiro Pereira Isidoro

1. Resiliência. 2. Drenagem Urbana. 3. Técnicas Sustentáveis. 4.
Modelagem. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia,
Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por seu amor e força nos momentos mais difíceis.

À minha esposa, Amanda Reis, pelo seu amor, compreensão e apoio.

Ao meu pai, Paulo Luiz da Fonseca, pelos seus conselhos técnicos e por ser um exemplo de profissional e de pessoa.

À minha mãe, Carla Lanzillotta da Fonseca, por sempre me apoiar em todos os desafios.

À minha irmã, Fabiana Lanzillotta da Fonseca, por seus conhecimentos e apoio, além de ser uma profissional exemplar.

Ao meu orientador Rodrigo Braga Moruzzi, por toda a dedicação, orientação e conselhos.

A todos os professores da UNESP que contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

A ocupação desordenada em centros urbanos, devido à ausência de um planejamento que contemplasse a drenagem como elemento fundamental da paisagem urbana, ocasionou a impermeabilização do solo com consequente aumento da geração do escoamento superficial e ocorrência de alagamentos no âmbito da microdrenagem e de inundações na macrodrenagem. Em um contexto de mudanças climáticas, ocasionadas pelo aumento crescente na temperatura atmosférica global e pela mudança do regime de precipitações, ações e intervenções visando a resiliência de cidades devem ser contempladas no planejamento urbano. Os sistemas de drenagem sustentáveis alcançam a redução do escoamento superficial, aumentam a capacidade de armazenamento e permitem a infiltração das águas pluviais no solo, com consequente impacto positivo no que se refere à resiliência dos centros urbanos. O presente trabalho visa avaliar a resiliência urbana associada à utilização de pavimentos permeáveis e telhados verdes como Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável, com ênfase na redução do escoamento superficial e no âmbito da microdrenagem, considerando estudo específico em loteamento situado na zona oeste da cidade do Rio de Janeiro. Neste estudo, foram contemplados cenários referentes à situação atual do sistema de drenagem urbana do loteamento, bem como uma previsão de utilização de pavimentos permeáveis nos logradouros e de telhados verdes nas coberturas das edificações. Para elaboração dos cenários, tomou-se partido do modelo numérico Storm Water Management Model – SWMM, adotando-se o modelo de propagação de onda cinemática e a equação de chuvas intensas do posto pluviométrico Bangu/RJ, para um tempo de recorrência de 10 anos. Com a utilização de asfalto poroso no leito carroçável das vias urbanas, blocos de concreto vazado nas calçadas e sistemas extensivos de telhados verdes em 70% das coberturas das edificações, verificou-se uma redução do escoamento superficial do loteamento da ordem de 53%, acarretando volumes inferiores de inundação em nós específicos da rede de drenagem, quando comparados aos cenários de situação atual do sistema de drenagem, bem como se constatou um acréscimo no valor do índice de resiliência operacional de 0,84 para 0,99 e de 0,85 para 0,99, em trechos específicos do sistema. Considerando-se o cenário de utilização de técnicas compensatórias de asfalto poroso, blocos de concreto vazado e 90% de sistemas extensivos de telhados verdes nas coberturas das edificações, obteve-se uma redução do escoamento superficial da ordem de 60% e resiliência operacional igual a 1,0 em todos os trechos do sistema. Os resultados obtidos nesta pesquisa demonstram que a adoção de técnicas sustentáveis em manejo de

águas pluviais, privilegiando o aumento da capacidade de armazenamento e permitindo a infiltração das águas pluviais, é uma alternativa a ser avaliada pelos gestores municipais como solução a ser integrada ao desenho das cidades, de forma a tornar as cidades mais resilientes no âmbito dos sistemas de microdrenagem.

Palavras-chave

Resiliência, drenagem urbana, técnicas sustentáveis, modelagem.

Abstract

The disorderly occupation that took place in urban centers, due to the lack of planning that contemplated the insertion of drainage as a fundamental element of the urban landscape, caused the waterproofing of the soil with a consequent increase in the generation of surface runoff and occurrence of flooding in the context of microdrainage and macrodrainage systems. In a context of climate change, caused by the growing increase in global atmospheric temperature and the change in the precipitation regime, actions and interventions aimed at the resilience of cities must be considered in urban planning. Sustainable drainage systems reduce surface runoff, increase storage capacity and allow rainwater to infiltrate the soil, with a consequent positive impact on the resilience of urban centers. The present work aims to evaluate the urban resilience associated with the use of permeable pavements and green roofs as Sustainable Urban Drainage Systems, with emphasis on the reduction of surface runoff and within the scope of microdrainage, considering a specific study in an allotment located in the west zone of the city of Rio de Janeiro. In this study, scenarios were considered regarding the current situation of the allotment's urban drainage system, as well as a forecast of the use of permeable pavements in the streets and green roofs on the roofs of the buildings. For the elaboration of the scenarios, the hydrological-hydraulic model Storm Water Management Model - SWMM was used, adopting the kinematic wave propagation model and the equation of intense rains of the Bangu/RJ pluviometric station, for a recurrence time of 10 years. With the use of porous asphalt in the roadbed of urban roads, concrete blocks poured on sidewalks and 70% of extensive systems of green roofs on the roofs of buildings, there was a reduction in surface runoff of the subdivision about 53%, resulting in lower volumes of flooding in specific nodes of the drainage network, when compared to the scenarios of the current situation of the current simulation of the drainage system, as well as an increase in the value of the operational resilience index from 0.84 to 0.99 and from 0.85 to 0.99, in specific sections of the system. Considering the scenario of using compensatory techniques of porous asphalt, hollow concrete blocks and 90% of extensive systems of green roofs on the roofs of buildings, a reduction in surface runoff of around 60% and operational resilience equal to 1.0 on all system runs. The results obtained in this research demonstrate that the adoption of sustainable techniques in rainwater management, favoring the increase in storage capacity and allowing the infiltration of rainwater, is an alternative to be

evaluated by municipal managers as a solution to be integrated into the design of the cities, in order to make cities more resilient within the scope of micro drainage systems.

Keywords

Resilience, urban drainage, sustainable techniques, modeling.

Índice de Figuras

Figura 1 – Bacias hidrográficas	7
Figura 2 – Ciclo hidrológico em bacias hidrográficas.....	7
Figura 3 – Hidrogramas contemplando cenários antes e após o processo de urbanização ...	9
Figura 4 - Classificação das técnicas compensatórias para o manejo de águas pluviais.....	19
Figura 5 - Objetivos das técnicas SUDS	20
Figura 6 - Cadeia de gestão do SUDS	21
Figura 7 – Sistemas clássico e sustentável de drenagem.....	22
Figura 8 – Reservatórios in-line	23
Figura 9 – Reservatórios off-line.....	23
Figura 10 – Bacia de retenção	24
Figura 11 – Bacia de detenção da Praça Niterói/RJ, em fase de obras.....	25
Figura 12 – Bacia de detenção da Praça Niterói/RJ, após urbanização.....	25
Figura 13 – Trincheira de infiltração	26
Figura 14 – Localização de valas vegetadas.....	27
Figura 15 – Vala vegetada com áreas verdes	28
Figura 16 – Poço de infiltração em Lyon	29
Figura 17 – Funcionamento de um telhado verde	30
Figura 18 – Elementos componentes de um telhado verde	30
Figura 19 – Telhado verde extensivo	31
Figura 20 – Telhado verde intensivo	31
Figura 21 – Estrutura de um jardim de chuva em área de estacionamento	33
Figura 22 – Jardim de chuva localizado no bairro de Copacabana, Rio de Janeiro/RJ	34
Figura 23 – Seção Transversal Típica de um pavimento permeável.....	35
Figura 24 – Permeabilidade do asfalto poroso	37
Figura 25 – Composição do concreto poroso	37
Figura 26 – Composição do bloco de concreto vazado	38
Figura 27 – Aplicação do bloco de concreto vazado em um estacionamento	38
Figura 28 - Modelo de reservatório não-linear para sub-bacias.	44
Figura 29 – Fluxograma metodológico da pesquisa.....	48
Figura 30 – Área de Estudo	49
Figura 31 – Documento 1-OBSP001008.....	49
Figura 32 – Divisão de áreas das bacias locais do loteamento	50
Figura 33 – Bacias locais com a inclusão do cadastro da rede de drenagem	50

Figura 34 – Camadas do pavimento permeável	52
Figura 35 – Camadas do telhado verde	53
Figura 36 – Rede N1-Deságue Out1	55
Figura 37 – Perfil da Rede N1-Deságue Out1	55
Figura 38 – Rede N8-N17	57
Figura 39 – Perfil da Rede N8-N17	58
Figura 40 – Telhados selecionados no software QGIS.....	60
Figura 41 – Demarcação do bloco de concreto vazado no software QGIS	61
Figura 42 – Demarcação do asfalto poroso no software QGIS	61
Figura 43 – Representação das técnicas compensatórias no QGIS	62
Figura 44 – Perfil da Rede N1-Out1	62
Figura 45 – Perfil da Rede N8-N17	66
Figura 46 - Telhados acrescentados visando a resiliência operacional máxima.....	70
Figura 47 – Técnicas utilizadas visando a resiliência operacional máxima	70
Figura 48 – Perfil da Rede N1-Out1	71
Figura 49 – Perfil da Rede N8-N17	74

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Causas e efeitos da urbanização sobre o escoamento superficial	8
Tabela 2 – Coeficientes de escoamento superficial.....	15
Tabela 3 – Componentes da microdrenagem	17
Tabela 4 – Eficiência na remoção de poluentes	40
Tabela 5 – Parâmetros de entrada do asfalto poroso	52
Tabela 6 – Parâmetros de entrada do bloco de concreto vazado	53
Tabela 7 – Parâmetros de entrada do telhado verde	53

Índice de Quadros

Quadro 1 – Coeficientes a, b, c, d da equação IDF (intensidade, duração e frequência)	10
Quadro 2 – Tempo de recorrência a ser adotado	11
Quadro 3 – Tempo de concentração para áreas urbanizadas	11
Quadro 4 – Coeficiente C _k – Kerby	13
Quadro 5 – Características das sub-bacias e rede de drenagem (PV-01 até PV-07)	51
Quadro 6 – Características das sub-bacias e rede de drenagem (PV-08 até PV-16)	51
Quadro 7– Relatório referente a rede N1-Deságue Out1	56
Quadro 8 – Relatório referente às vazões máximas e volumes afluentes em PV's da rede N1-Deságue Out1	56
Quadro 9 – Relatório referente extravasamento em PV's da rede N1-Deságue Out1	56
Quadro 10 – Relatório referente a rede N8-N17	58
Quadro 11 – Relatório referente às vazões máximas e volumes afluentes em PV's da rede N8-N17	59
Quadro 12 – Relatório referente extravasamento em PV's da rede N8-N17	59
Quadro 13 – Relatório referente a rede N1-Out1	63
Quadro 14 – Relatório referente extravasamento em PV's da rede N1-Deságue Out1	63
Quadro 15 – Relatório referente às vazões máximas e volumes afluentes em PV's da rede N1-Out1	64
Quadro 16 – Relatório referente a rede N8-N17	66
Quadro 17 – Relatório referente extravasamento em PV's da rede N8-N17	67
Quadro 18 – Relatório referente às vazões máximas e volumes afluentes em PV's da rede N8-N17	67
Quadro 19 - Relatório referente a rede N1-Out1	71
Quadro 20 - Relatório referente às vazões máximas e volumes afluentes em PV's da rede N1-Out1	72
Quadro 21 - Relatório referente a rede N8-N17	74
Quadro 22 - Relatório referente às vazões máximas e volumes afluentes em PV's da rede N8-N17	75

Índice de Gráficos

Gráfico 1 – Volume máximo de entrada nos cenários apresentados da rede N1-Out1	64
Gráfico 2 – Vazão Específica de acordo com o comprimento acumulado nos cenários apresentados da rede N1-Out1	65
Gráfico 3 – Índice de resiliência operacional nos cenários apresentados da rede N1-Out1	65
Gráfico 4 – Volume máximo de entrada nos cenários apresentados da rede N8-N17	68
Gráfico 5 – Vazão Específica de acordo com o comprimento acumulado nos cenários apresentados da rede N8-N17	68
Gráfico 6 – Índice de resiliência operacional nos cenários apresentados da rede N8-N17.	69
Gráfico 7 - Volume máximo de entrada nos cenários apresentados da rede N1-Out1	73
Gráfico 8 – Vazão Específica de acordo com o comprimento acumulado no cenário com resiliência operacional máxima na rede N1-OUT1	73
Gráfico 9 - Volume máximo de entrada nos cenários apresentados da rede N8-N17	75
Gráfico 10 – Vazão Específica de acordo com o comprimento acumulado no cenário com resiliência operacional máxima na rede N1-OUT1	76

Lista de Abreviaturas e Siglas

CPA - Camada Porosa de Asfalto

IDF - intensidade, duração e frequência

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

N - Nitrogênio

P - Fósforo

PV - Poço de Visita

Reso - Índice de Resiliência Operacional

SST - sólidos suspensos totais

SUDS - Sistema de Drenagem Urbana Sustentável

SWMM - Storm Water Management Model

US EPA - *U. S. Environmental Protection Agency*

Sumário

RESUMO.....	I
ABSTRACT	III
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABELAS	VII
ÍNDICE DE QUADROS	VIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	X
SUMÁRIO.....	XI
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2.2 JUSTIFICATIVA	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 URBANIZAÇÃO E IMPACTOS SOBRE O CICLO HIDROLÓGICO	5
3.2 GRANDEZAS CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO	9
3.2.1 <i>Intensidade Pluviométrica (I)</i>	9
3.2.2 <i>Tempo de Recorrência ou Retorno (TR)</i>	11
3.2.3 <i>Tempo de Concentração</i>	11
3.3 COEFICIENTE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL (C)	14
3.4 MICRODRENAGEM	16
3.4.1 <i>Principais Elementos</i>	17
3.5 MACRODRENAGEM	18
3.6 TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS EM MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS	18
3.7 MEDIDAS ESTRUTURAIS DE DRENAGEM URBANA	22
3.7.1 <i>Bacias de Retenção</i>	24
3.7.2 <i>Bacias de Detenção</i>	24
3.7.3 <i>Trincheiras de Infiltração</i>	25
3.7.4 <i>Valas vegetadas</i>	27

3.7.5	<i>Poços de Infiltração</i>	28
3.7.6	<i>Telhados Verdes</i>	29
3.7.7	<i>Jardins de Chuva</i>	33
3.7.8	<i>Pavimentos Permeáveis</i>	34
3.7.9	<i>Benefícios na implantação de medidas de controle na fonte</i>	39
3.8	MEDIDAS NÃO ESTRUTURAIS DE DRENAGEM URBANA	40
3.9	RESILIÊNCIA URBANA NO MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS	41
4	MODELO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO SWMM	43
5	MATERIAIS E MÉTODOS	47
5.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA SELECIONADA	48
5.2	PARÂMETROS DE ENTRADA PARA AS TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS	52
5.2.1	<i>Parâmetros para o Pavimento Permeável</i>	52
5.2.2	<i>Parâmetros do Telhado Verde</i>	53
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
6.1	CENÁRIO ATUAL	54
6.1.1	<i>Rede N1-Deságue Out1</i>	54
6.1.2	<i>Rede N8-N17</i>	57
6.2	CENÁRIO PROPOSTO CONTEMPLANDO TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS	60
6.2.1	<i>Rede N1-Deságue Out1</i>	62
6.2.2	<i>Rede N8-N17</i>	66
6.3	CENÁRIO COM TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS COM ÍNDICE DE RESILIÊNCIA OPERACIONAL MÁXIMO EM TODA REDE DE DRENAGEM	69
6.3.1	<i>Rede N1-Deságue Out1</i>	71
6.3.2	<i>Rede N8-N17</i>	73
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

1 INTRODUÇÃO

A falta de um planejamento urbano sustentável com a consolidação de construções irregulares, desmatamento e consequente impermeabilização do solo ocasionaram a ocorrência de inundações advindas de eventos de chuvas intensas, com prejuízos materiais e humanos.

O conceito de urbanização pode ser definido como o crescimento populacional no meio urbano e como consequência tem-se o fenômeno chamado de adensamento populacional. Este processo foi acentuado de forma intensa no início da 1ª revolução industrial, no qual os países desenvolvidos começaram a alterar os seus cenários e os métodos de trabalho. Em contrapartida, o desenvolvimento urbano desenfreado e sem planejamento também causou diversos problemas na sociedade, tais como falta de habitação, modificação da utilização do solo, carência de estradas e de saneamento, e o crescente desemprego.

A retirada da vegetação e a substituição das áreas naturais por elementos impermeáveis, tais como telhados, pavimentos e edificações, interferem diretamente no ciclo hidrológico natural da região, modificando drasticamente as parcelas de infiltração e escoamento superficial, aumentando a possibilidade de enchentes e suas consequências (BENINI; MENDIONDO, 2015).

No que tange às intervenções projetadas e executadas no âmbito da micro e macrodrenagem urbana, até aproximadamente os anos 2000, foram contempladas medidas ditas tradicionais, privilegiando a ampliação da capacidade do sistema de drenagem e ocasionando, em geral, a ampliação de cheias à jusante.

Nas últimas décadas, no que tange ao planejamento urbano, não houve uma priorização do traçado original dos cursos d'água, com a ocupação das áreas de fundo de vale e as faixas marginais de proteção em sistemas de macrodrenagem, contribuindo para a ocorrência de inundações em centros urbanos com ocupação consolidada.

Em um contexto de mudanças climáticas, ocasionadas pelo aumento crescente na temperatura atmosférica global e pela mudança do regime de precipitações com aumento da frequência de eventos de chuvas intensas, ações e intervenções visando a resiliência de cidades devem ser contempladas no planejamento urbano. De certa forma, a resiliência de centros urbanos também está associada à capacidade de resistir ou se recuperar dos impactos advindos de mudanças climáticas, sendo necessárias ações que garantam superar tais desafios.

Numa concepção adequada e sustentável, a rede de drenagem deve ser entendida como componente do espaço e da paisagem urbana, sendo impossível dissociá-la da infraestrutura da cidade (SOUZA; MORAES; BORJA, 2013). Nesta linha de atuação, contempla-se o controle do escoamento superficial através de medidas ditas compensatórias, que promovam a infiltração e o armazenamento temporário das águas pluviais, de forma a compensar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos. Segundo Lourenço (2014), Sistema Urbano de Drenagem Sustentável (SUDS) alcança a redução do escoamento superficial, aumenta a capacidade de armazenamento e permite a infiltração das águas pluviais no solo. As técnicas sustentáveis também têm como objetivo evitar processos erosivos do solo, de forma a mitigar a perda de capacidade dos mananciais.

No que se refere ao controle na fonte localizado, destacam-se os telhados verdes ou “ecoroofs”, os microreservatórios, os poços de infiltração e os sistemas de biorretenção, tais como biovaletas e os jardins de chuva. No que tange ao controle linear, destacam-se as trincheiras de infiltração, valas de detenção, valas de infiltração, pavimentos permeáveis e áreas úmidas lineares ou parques lineares.

A resiliência urbana refere-se à persistência dos sistemas naturais frente às mudanças nas variáveis do ecossistema devido a causas naturais ou antropogênicas. Com as recentes mudanças climáticas, a adaptação e implementação de sistemas SUDS, com um planejamento e gestão integrados, podem aumentar a resiliência e tornam-se cada vez mais importantes para manter nossa cidade habitável a longo prazo (DONG et al., 2017).

2 OBJETIVOS

O presente trabalho visa avaliar a resiliência urbana associada à utilização de pavimentos permeáveis e telhados verdes como Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável (SUDS), em cenário de mudanças climáticas, com ênfase na redução do escoamento superficial e no âmbito da microdrenagem, considerando estudo em loteamento situado na zona oeste da cidade do Rio de Janeiro.

2.1 Objetivos Específicos

- Caracterizar a rede de microdrenagem em loteamento situado na zona oeste da cidade do Rio de Janeiro, bem como avaliar as condições hidráulicas do cenário atual do sistema, contemplando o modelo hidrológico-hidráulico Storm Water Management Model – SWMM;
- Propor a implantação de pavimentos permeáveis de asfalto poroso e de blocos de concreto vazado, em áreas públicas do loteamento, bem como a utilização de telhados verdes extensivos nas coberturas das edificações, utilizando a multiplataforma de Sistema de Informação Geográfica QGIS, em cenário de mudanças climáticas;
- Avaliar as condições hidráulicas do sistema considerando cenário com utilização de técnicas SUDS elencadas, contemplando o modelo hidrológico-hidráulico Storm Water Management Model – SWMM;
- Analisar índices de resiliência operacional, considerando o cenário atual do sistema de microdrenagem e o cenário proposto contemplando as técnicas SUDS elencadas, com ênfase na redução do escoamento superficial e visando a robustez e a flexibilidade de resposta do sistema;

2.2 Justificativa

Mudanças climáticas devem ser consideradas no planejamento e projeto de cidades resilientes, principalmente no que se refere ao aumento de eventos de chuvas intensas e consequente poluição difusa de origem pluvial.

As técnicas compensatórias com controle na fonte se apresentam como soluções para controle do escoamento superficial e consequente requalificação de áreas, auxiliando

no controle de carga difusa em bacias hidrográficas urbanas e consolidadas, principalmente no que se refere à preservação e restauração da mata ciliar.

A utilização de modelo matemático para simulação de cenários, associados às técnicas sustentáveis em manejo de águas pluviais urbanas, é uma ferramenta fundamental para avaliar a viabilidade de implantação destas intervenções no que tange ao controle do escoamento superficial, a requalificação de áreas e à resiliência urbana. O modelo Stormwater Management Model – SWMM considera vários processos hidrológicos dos quais contempla a captação e retenção das precipitações e dos escoamentos em diversos dispositivos de baixo impacto.

A multiplataforma de Sistema de Informação Geográfica QGIS oferece suporte à visualização, edição e análise de dados geoespaciais, permitindo a avaliação de coberturas de edificações, para implantação de telhados verdes extensíveis, e de áreas públicas para implantação de pavimentos permeáveis de asfalto poroso e de blocos de concreto vazado.

Diversos aspectos ambientais se relacionam com o objeto da pesquisa, caracterizando-se como um tema de fundamental importância no planejamento urbano sustentável e no controle do escoamento superficial e consequente redução do surgimento de doenças de veiculação hídrica.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O conceito de inundação pode ser definido como o processo de extravasamento das águas do canal de drenagem para as áreas marginais quando a enchente atinge cota acima do nível máximo da calha principal do rio. As enchentes podem ser definidas como a elevação temporária do nível d'água em um canal de drenagem devida ao aumento da vazão ou descarga. Já os alagamentos correspondem ao acúmulo momentâneo de águas em uma área decorrente de deficiência do sistema de drenagem e que podem ou não estar relacionados com processos fluviais (IPT, 2007).

A importância do ciclo hidrológico é incontestável quando o assunto discutido é o uso da água. Os cursos d'água tiveram um impacto negativo devido à falta de planejamento do uso do solo que contemplasse tais elementos no desenho urbano das cidades. A diminuição das áreas permeáveis nos grandes centros resulta na alteração do escoamento e no balanço hídrico das águas pluviais. Estas mudanças dificultam a infiltração de águas superficiais e o armazenamento superficial (BAPTISTA, NASCIMENTO E BARRAUD apud GUEDES, 2015).

3.1 Urbanização e Impactos sobre o Ciclo Hidrológico

Segundo Silva (2015), o ciclo hidrológico é um fenômeno de circulação contínuo da água entre a superfície terrestre e atmosférica no qual a fonte fundamental é a energia solar associada à gravidade e a rotação da terra.

A água é o recurso natural mais importante e participa e dinamiza todos os ciclos ecológicos; os sistemas aquáticos têm uma grande diversidade de espécies úteis ao homem e que são também parte ativa e relevante dos ciclos biogeoquímicos e da diversidade biológica do planeta Terra (TUNDISI, 2003).

Devido à energia solar, ocorre a evaporação da água da superfície dos espelhos d'água e da superfície terrestre, além da evapotranspiração das vegetações para a atmosfera, fenômeno chamado de evaporação. Ocorre a condensação e com a ação da gravidade sobre a Terra, a água condensada se precipita em forma de chuva. (SILVA, 2015).

Após a água entrar em contato com o solo, existem duas possibilidades: escoar superficialmente ou infiltrar no solo. Quando infiltrada, a água segue para um aquífero ou escoar subsuperficialmente pelos canais internos do solo em direção a superfície ou aos

cursos d'água. (TUCCI, 1997). Parte da precipitação é retida na vegetação e quanto maior é a superfície das folhas, maior a quantidade de água retida que depois será evaporada e o ciclo irá continuar. As raízes das plantas retiram a umidade do solo e perdem para o ambiente através do fenômeno transpiração. (TUCCI, 1997).

A infiltração é definida como a entrada da água superficial para o interior do solo, variando de acordo com o seu tipo e a quantidade de água e ar na estrutura. Nos pavimentos porosos, tema que será abordado neste projeto, a infiltração é a principal etapa, pois quanto maior seu potencial, mais eficiente será o tipo do pavimento permeável.

Já as águas que escorrem superficialmente têm como destino rios, córregos, lagoas, riachos, oceanos etc. É uma etapa importante, pois a partir dele pode ocorrer a erosão do solo e inundações. Segundo Collischonn (2010), é necessário que ocorra a divisão do território de acordo com a geografia nas bacias hidrográficas, nos quais correspondem a áreas de captação natural dos fluxos d'água que têm sua origem a partir das precipitações, englobando as infiltrações e o escoamento superficial. É importante ressaltar que os limites da bacia estão em encontro com os pontos mais altos do terreno (linha de cumeada) e as águas prosseguem para o ponto baixo da bacia onde se encontra o rio principal. Na figura 1, é possível exemplificar as bacias hidrográficas, com o caminho que a água percorre até o seu exutório, que pode ser um lago, rio ou oceano.

Com isso, pode-se utilizar a equação do balanço hídrico (1), a partir do uso de variáveis que influenciam diretamente no comportamento de uma bacia hidrográfica.

$$P = ET + ES + \Delta S \quad (1)$$

Onde:

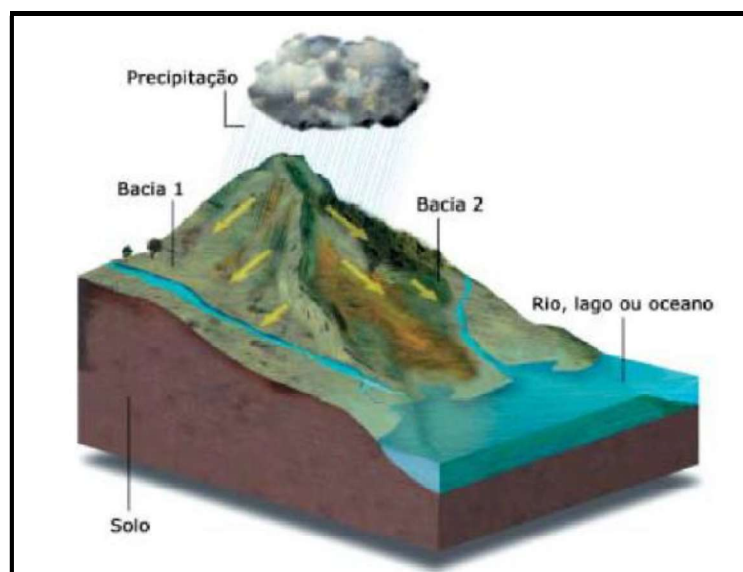
P: precipitação;

ET: evapotranspiração;

ES: escoamento superficial;

ΔS : variação da infiltração.

Figura 1 – Bacias hidrográficas



Fonte: Feam (2006)

O cenário de urbanização acelerada, tendo por base a ausência de um planejamento harmônico dos centros urbanos, ocasionou a remoção da cobertura vegetal e a impermeabilização do solo, principalmente devido aos novos empreendimentos, às ocupações irregulares e à utilização de pavimentação não permeável. A figura 2 ilustra o comportamento do ciclo hidrológico em bacias hidrográficas, antes e após o processo de urbanização não planejada.

Figura 2 – Ciclo hidrológico em bacias hidrográficas



(a) Bacia não urbanizada

(b) Bacia urbanizada

Fonte: Adaptado de Mendes (2019).

O processo de impermeabilização do solo gera danos sociais, ambientais, com degradação da qualidade da água e propiciando o surgimento de doenças de veiculação hídrica, além de prejuízos econômicos. Milograna (2001) apresenta as causas e efeitos da urbanização sobre o escoamento superficial.

Tabela 1 – Causas e efeitos da urbanização sobre o escoamento superficial

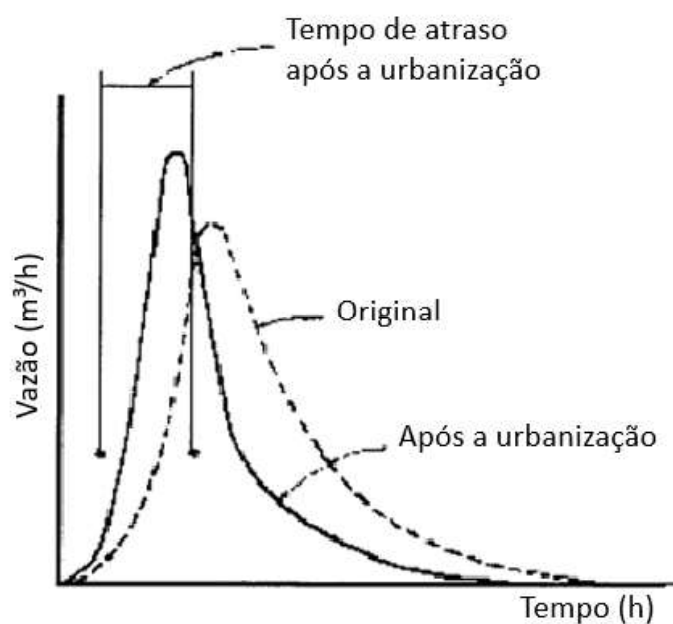
IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO	
CAUSAS	EFEITOS
Impermeabilização	Maiores picos de vazões
Revestimento das redes de drenagem	Maiores picos à jusante
Geração de resíduos sólidos urbanos	Entupimentos de galerias e degradação da qualidade da água
Implantação de redes de esgoto sanitário deficientes	Degradação da qualidade da água e moléstias de veiculação hídrica nas inundações
Desmatamento e desenvolvimento indisciplinado	Maiores picos e volumes; maior erosão; assoreamento em galerias e canais
Ocupação das várzeas e fundos de vale	Maiores picos das vazões; grandes prejuízos; moléstias de veiculação hídrica; altos custos de utilidades públicas

Fonte: Milograna (2001).

Nesse contexto, com o objetivo de mitigar os impactos da urbanização sobre os processos hidrológicos, toma-se partido dos Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável (SUDS), de forma a reduzir o escoamento superficial, aumentar a capacidade de armazenamento e permitir a infiltração das águas pluviais no solo.

A figura 3 ilustra os hidrogramas contemplando cenários antes e após o processo de urbanização não planejada. Com a retirada da cobertura vegetal e o processo de impermeabilização, há o aumento da vazão de pico do hidrograma e a consequente diminuição do tempo de ocorrência da vazão de pico.

Figura 3 – Hidrogramas contemplando cenários antes e após o processo de urbanização



Fonte: Adaptado de Leopold (1968)

3.2 Grandezas Características da Precipitação

As grandezas que caracterizam a precipitação são a altura pluviométrica, a duração, a intensidade e a frequência da precipitação.

A altura pluviométrica é a medida da altura de lâmina de água de chuva acumulada sobre uma superfície, expressa em milímetros e obtida pelo uso de pluviômetros. Já a duração corresponde ao período de tempo durante o qual ocorreu o evento de precipitação, expressa em minutos ou horas, enquanto a frequência da precipitação corresponde à estimativa de probabilidade, sendo expressa pelo inverso do tempo de recorrência ou período de retorno. A intensidade da precipitação, tempo de recorrência ou período de retorno de um evento e tempo de concentração destacam-se como de extrema importância na elaboração de projetos de manejo de águas pluviais.

3.2.1 Intensidade Pluviométrica (*I*)

A intensidade pluviométrica (*I*) pode ser definida como a relação entre quantidade de chuva por unidade de tempo. A quantidade de água precipitada (*P*) é dada em mm. A unidade de tempo pode ser dada em horas ou minutos (*t*). A fórmula é dada pela equação número 2.

$$I = P/t \quad (2)$$

Existem outras formas para o cálculo da intensidade pluviométrica (I). Segundo Tomaz (2002), uma delas é a equação de Paulo S. Wilken que é utilizada para Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), e que se apresenta na equação número 3.

$$I = (1747,9 \times Tr^{0,181})/(t + 15)^{0,89} \quad (3)$$

Onde:

Tr : tempo de recorrência ou retorno (anos);

t: duração da chuva (minutos).

Rio-Águas (2019) adota a equação número 4, referente à intensidade, duração e frequência (IDF), para o cálculo da intensidade pluviométrica no município do Rio de Janeiro.

$$I = (a \times Tr^b)/(t + c)^d \quad (4)$$

Onde:

I: intensidade pluviométrica, em mm/h;

Tr: tempo de recorrência, em anos;

T: tempo de duração da precipitação, em minutos;

a, b, c e d: valores dos coeficientes conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Coeficientes a, b, c, d da equação IDF (intensidade, duração e frequência)

Pluviômetro	a	b	c	d
Santa Cruz	711,3	0,18	7,00	0,687
Campo Grande	891,6	0,18	14,0	0,689
Mendanha	843,7	0,17	12,0	0,698
Bangu	1.208	0,17	14,0	0,788
Jardim Botânico	1.239	0,15	20,0	0,740
Capela Mayrink	921,3	0,16	15,4	0,673
Via11	1.423	0,19	14,5	0,796
Sabóia Lima	1.782	0,17	16,6	0,841
Realengo	1.164	0,14	6,96	0,769
Irajá	5.986	0,15	29,7	1,050
Eletrobrás -Taquara	1.660	0,15	14,7	0,841

Fonte: Rio-Águas (2019)

3.2.2 *Tempo de Recorrência ou Retorno (TR)*

O tempo de recorrência ou período de retorno é o tempo médio que determinado evento hidrológico é igualado ou superado pelo menos uma vez. (RIGHETO, 1998 apud TOMAZ, 2002).

Segundo Rio-Águas (2019), o município do Rio de Janeiro utiliza o tempo de recorrência que é apresentado no quadro 2, de acordo com o tipo de dispositivo de drenagem.

Quadro 2 – Tempo de recorrência a ser adotado

Tipo de Dispositivo de Drenagem	Tempo de Recorrência (TR - Anos)
Microdrenagem - dispositivos de drenagem superficial, galerias de águas pluviais.	10
Aproveitamento da rede existente - microdrenagem.	5
Canais de macrodrenagem não revestidos.	10
Canais de macrodrenagem revestidos, com verificação para $T_r = 50$ anos sem considerar borda livre.	25

Fonte: Rio-Águas (2019)

3.2.3 *Tempo de Concentração*

Segundo Tomaz (2002) é o tempo que uma gota de água leva para percorrer do ponto mais distante até a seção que define o limite da bacia. Existem três formas de como essa água chega ao ponto mais distante: escoamento superficial, escoamento em tubos e escoamento em canais.

Nos projetos de microdrenagem, devem-se seguir os tempos de concentração que estão descritos no quadro 3, de acordo com a declividade da sarjeta. (RIO-ÁGUAS, 2019).

Quadro 3 – Tempo de concentração para áreas urbanizadas

Tipologia da área a montante	Declividade da sarjeta	
	< 3%	> 3%
Áreas de construções densas	10 min.	7 min.
Áreas residenciais	12 min	10 min
Parques, jardins, campos	15 min	12 min

Fonte: Rio-Águas (2019)

Segundo Rio-Águas (2019), especialmente nas áreas urbanas, o tempo de concentração pode ser dividido em duas parcelas, de acordo com a equação número 5.

$$t_c = t_p + t_e \quad (5)$$

Onde:

t_c : tempo de concentração (min);

t_p : tempo de percurso – tempo de escoamento dentro da galeria ou canal, calculado pelo método cinemático (min);

t_e : tempo de entrada – tempo gasto pelas chuvas caídas nos pontos mais distantes da bacia para atingirem o primeiro ralo ou seção considerada (min).

O tempo de entrada (t_e) pode também ser subdividido em parcelas:

$$t_e = t_1 + t_2 \quad (6)$$

Onde:

t_e : tempo de entrada (min);

t_1 : tempo de escoamento superficial no talvegue – tempo de escoamento das águas pelo talvegue até alcançar o primeiro ralo ou seção considerada, calculado pela equação de George Ribeiro ou pela equação de Kirpich (min);

t_2 : tempo de percurso sobre o terreno natural – tempo de escoamento das águas sobre o terreno natural, fora dos sulcos, até alcançar o ponto considerado do talvegue, calculado pela equação de Kerby (min).

- Cálculo de t_1 pela equação de George Ribeiro

$$t_1 = 16 L_1 / (1,05 - 0,2 p) (100 S_1)^{0,04} \quad (7)$$

Onde:

t_1 : tempo de escoamento superficial (min);

L_1 : comprimento do talvegue principal (Km);

p : porcentagem, em decimal, da área da bacia coberta de vegetação;

S_1 : declividade média do talvegue principal (Km).

- Cálculo de t_1 pela equação de Kirpich

$$t_1 = (0,39) (L^2 / S)^{0,385} \quad (8)$$

Onde:

t1: tempo de escoamento superficial (h);

L: comprimento do talvegue (Km);

S: declividade média do talvegue da bacia (Km).

A equação de Kerby é adotada para calcular a parcela t2, relativa ao percurso no terreno natural até alcançar o talvegue (RIO-ÁGUAS, 2019).

- Cálculo de t2 pela equação de Kerby

$$t2 = 1,44(L2 Ck (1/S2^{0,5}))^{0,47} \quad (9)$$

Onde:

t2: tempo de escoamento superficial (min);

L2: comprimento do percurso considerado (Km);

Ck: coeficiente determinado pelo quadro 4;

S2: declividade média do terreno (m/m).

Quadro 4 – Coeficiente Ck – Kerby

<i>Tipo de superfície</i>	<i>Coeficiente C_k</i>
Lisa e impermeável	0,02
Terreno endurecido e desnudo	0,10
Pasto ralo, terreno cultivado em fileiras e superfície desnuda, moderadamente áspera	0,20
Pasto ou vegetação arbustiva	0,40
Mata de árvores decíduas	0,60
Mata de árvores decíduas tendo o solo recoberto por espessa camada de detritos vegetais	0,80

Fonte: Rio-Águas (2019)

A aplicação do método cinemático depende da velocidade correspondente ao escoamento em regime permanente e uniforme (RIO-ÁGUAS, 2019).

- Método Cinemático

$$tp = 16,67 \sum (L_i/V_i) \quad (10)$$

Onde:

t_p : tempo de percurso (minutos);

L_i : comprimento do talvegue (trechos homogêneos) (Km);

V_i : velocidade do trecho considerado (m/s).

As velocidades poderão ser estimadas pela fórmula de Manning, adotando-se o valor de 0,50 para o raio hidráulico em canais retangulares, 0,61 para canais trapezoidais e 1/4 do diâmetro para seções circulares, conforme a equação número 11 (RIO-ÁGUAS, 2019).

$$V = R_h^{2/3} S^{1/2} n^{-1} \quad (11)$$

Onde:

V : velocidade (m/s);

R_h : raio hidráulico (m);

S : declividade do trecho (m/m);

n : coeficiente de rugosidade.

3.3 Coeficiente de Escoamento Superficial (C)

O coeficiente de escoamento superficial ou coeficiente de run-off e expressa a relação entre volume total escoado em uma bacia e o volume total precipitado desta. É variável, pois depende de diversos fatores como o tipo de solo, sua umidade e capacidade de infiltração, o uso e ocupação do solo, a rede de drenagem e entre outros parâmetros. (PAIVA et al., 2003).

O coeficiente de escoamento superficial deve variar entre 0 e 1 e quanto maior esse valor, menos permeável é a área em questão. Quanto menor o valor do coeficiente, mais permeável é sua área e bem vegetadas. (CASTRO, 2011).

Schueller (1987) descreve que o coeficiente de escoamento superficial pode ser calculado pela equação número 12.

$$C = 0,05 + (0,009 \times AI) \quad (12)$$

Onde:

C: coeficiente de escoamento superficial;

AI: área impermeável (%).

No Rio de Janeiro, Rio-Águas (2019) adota os valores para dimensionamento apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Coeficientes de escoamento superficial

Tipologia da área de drenagem	Coeficiente de escoamento superficial
Áreas comerciais	
Áreas centrais	0,70 – 0,95
Áreas de bairros	0,50 – 0,70
Áreas residenciais	
Residenciais isoladas	0,35 – 0,50
Unidades múltiplas, separadas	0,40 – 0,60
Unidades múltiplas, conjugadas	0,60 – 0,75
Áreas com lotes de 2.000 m ² ou maiores	0,30 – 0,45
Áreas suburbanas	0,25 – 0,40
Áreas com prédios de apartamentos	0,50 – 0,70
Áreas Industriais	
Área com ocupação esparsa	0,50 – 0,80
Área com ocupação densa	0,60 – 0,90
Superfícies	
Asfalto	0,70 – 0,95
Concreto	0,80 – 0,95
Blocket	0,70 – 0,89
Paralelepípedo	0,58 – 0,81
Telhado	0,75 – 0,95
Solo compactado	0,59 – 0,79
Áreas sem melhoramentos ou naturais	
Solo arenoso, declividade baixa < 2 %	0,05 – 0,10
Solo arenoso, declividade média entre 2% e 7%	0,10 – 0,15

Tabela 2 – Coeficientes de escoamento superficial (Continuação)

Solo arenoso, declividade alta > 7 %	0,15 – 0,20
Solo argiloso, declividade baixa < 2 %	0,15 – 0,20
Solo argiloso, declividade média entre 2% e 7%	0,20 – 0,25
Solo argiloso, declividade alta > 7 %	0,25 – 0,30
Grama, em solo arenoso, declividade baixa < 2%	0,05 - 0,10
Grama, em solo arenoso, declividade média entre 2% e 7%	0,10 - 0,15
Grama, em solo arenoso, declividade alta > 7%	0,15 - 0,20
Grama, em solo argiloso, declividade baixa < 2%	0,13 - 0,17
Grama, em solo argiloso, declividade média 2% < S < 7%	0,18 - 0,22
Grama, em solo argiloso, declividade alta > 7%	0,25 - 0,35
Florestas com declividade <5%	0,25 – 0,30
Florestas com declividade média entre 5% e 10%	0,30 -0,35
Florestas com declividade >10%	0,45 – 0,50
Capoeira ou pasto com declividade <5%	0,25 – 0,30
Capoeira ou pasto com declividade entre 5% e 10%	0,30 – 0,36
Capoeira ou pasto com declividade > 10%	0,35 – 0,42

Fonte: Rio Águas (2019)

Segundo Tomaz (2002), quando a área de drenagem é heterogênea é preciso fazer a média ponderada dos coeficientes de deflúvio de cada área para chegar ao coeficiente de escoamento final.

3.4 Microdrenagem

A microdrenagem pode ser conhecida como um sistema inicial de drenagem ou coletor de águas pluviais e atende projetos de drenagem no qual a precipitação é de risco hidrológico moderado, ou seja, tempo de retorno entre 2 e 10 anos. (TOMINAGA, 2013). Pode ser também caracterizada como um sistema de drenagem urbana compreendida por componentes como— sarjetas, meio fio, bocas de lobo, poços de visita, tubos e conexões e os condutos forçados. Possui como principal finalidade coletar e conduzir a água pluvial até o sistema de macrodrenagem e retirar a água pluvial dos pavimentos das vias públicas, evitar alagamentos e inundações, oferecer segurança a todos os indivíduos que circulem o local e evitar ou reduzir danos. É importante ressaltar que a limpeza do sistema inicial de

drenagem deve ser feita com regularidade e com maior frequência, principalmente quando ocorrem chuvas de maior intensidade.

Segundo Rio-Águas (2019), microdrenagem é o sistema composto pelo pavimento das ruas, sarjetas, caixas de ralo, galerias de águas pluviais, canaletas e canais de pequenas dimensões, com vazões inferiores ou iguais a $10\text{m}^3/\text{s}$; geralmente, dimensionado para um período de retorno de 10 anos.

3.4.1 Principais Elementos

Segundo Tucci (1995), os principais elementos de um sistema de microdrenagem são: galeria, poços de visita, bocas de lobo entre outros importantes que fazem a ligação com o sistema de macrodrenagem. A tabela 3 demonstra os principais elementos e suas principais funções.

Tabela 3 – Componentes da microdrenagem

Terminologia	Descrição
Galeria	Canalizações utilizadas para a condução das águas pluviais que adentram o sistema por meio das bocas de lobo e das ligações privadas
Poços de visita	Dispositivos localizados em pontos estratégicos do sistema de galerias para permitirem a inspeção e limpeza. São localizados em média a cada 100m
Trecho	Porção da galeria situada entre dois poços de visita.
Bocas de lobo	Dispositivos localizados nas sarjetas, para a captação de águas pluviais.
Conduitos de ligação	Canalizações que conduzem as águas pluviais captadas nas bocas de lobo para as caixas de ligação ou poços de visita a jusante.
Caixas de ligação	Caixas de concreto ou alvenaria, sem tampão externo ou visitável ao nível da rua
Meios-fios	Estruturas dispostas entre o passeio e a via de rodagem, paralelas ao eixo da rua e cuja face superior posiciona-se no mesmo nível do passeio.
Sarjetas	Canais situados junto ao meio-fio e ao longo da via, que recebem as águas do escoamento superficial e as conduz para os locais de captação (bocas de lobo)
Sarjetões	Calhas localizadas nos cruzamentos das vias, que conduzem o fluxo das águas na travessia de ruas transversais ou desviam o fluxo de um lado para o outro.

Tabela 3 – Componentes da microdrenagem (continuação)

Estruturas de dissipação de energia hidráulica	São utilizadas nas saídas das galerias em cursos d'água para evitar erosão causada pela concentração do escoamento pluvial.
Condutores forçados	Elementos que conduzem as águas pluviais sob pressão diferente da atmosférica
Estações de bombeamento	Equipamentos utilizados para conduzir as águas pluviais em locais onde o escoamento por gravidade não é possível.

Fonte: Tominaga (2013)

3.5 Macrodrenagem

A macrodrenagem corresponde à rede de drenagem natural, pré-existente à urbanização, constituída por rios e córregos, localizados nos talvegues dos vales, e que pode receber obras que a modificam e complementam, tais como canalizações, barragens, diques e outras (AQUAFLUXUS, 2022).

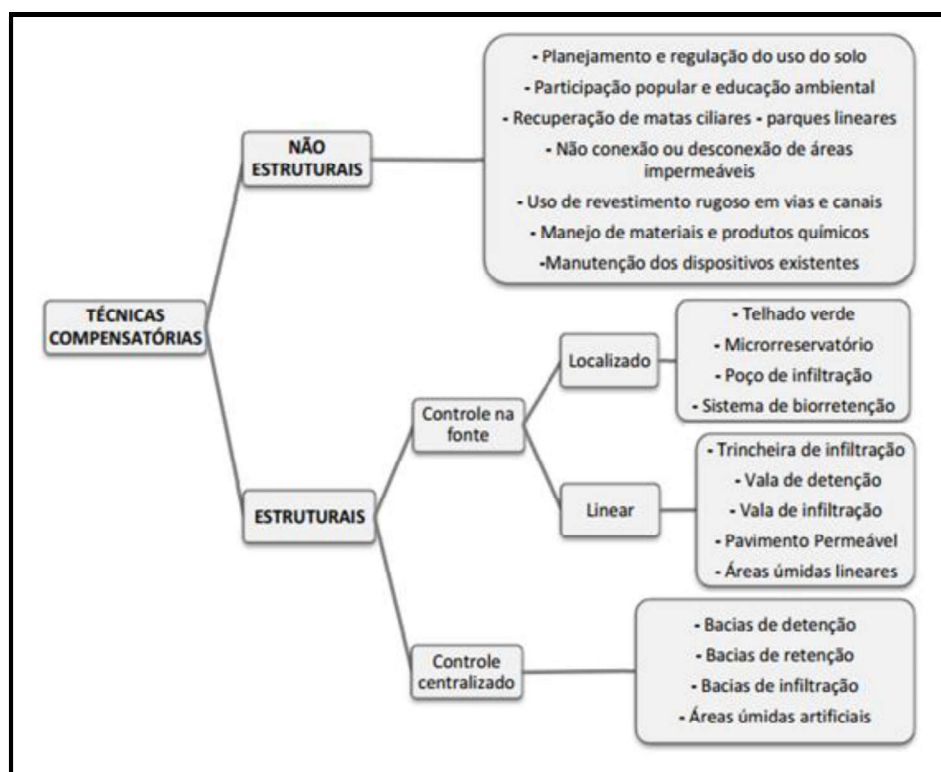
Segundo Rio-Águas (2019), macrodrenagem é o sistema constituído por canais de maiores dimensões, que recebem as contribuições do sistema de microdrenagem e as lançam no corpo receptor; geralmente dimensionado para o período de retorno de 25 anos, veiculando vazões superiores a 10m³/s.

A ausência de uma infraestrutura robusta em macrodrenagem pode ocasionar inundações, doenças de veiculação hídrica, ocorrência de deslizamentos e danos ao patrimônio público e à vida humana.

3.6 Técnicas Compensatórias em Manejo de Águas Pluviais

As alternativas desenvolvidas para agir em conjunto com as estruturas convencionais de drenagem, buscando compensar os efeitos da urbanização, diminuir o volume escoado, favorecer a retenção e infiltração das águas precipitadas e resgatar os processos envolvidos no ciclo hidrológico são chamadas de técnicas compensatórias (AGOSTINHO; POLETO, 2012). A figura 4 elenca as técnicas estruturais com controle na fonte, subdivididas em um enfoque localizado (telhados verdes, microrreservatórios, poços de infiltração e sistemas de biorretenção), bem como em um enfoque linear (trincheiras de infiltração, valas de retenção, valas de infiltração, pavimentos permeáveis e áreas úmidas lineares ou parques lineares).

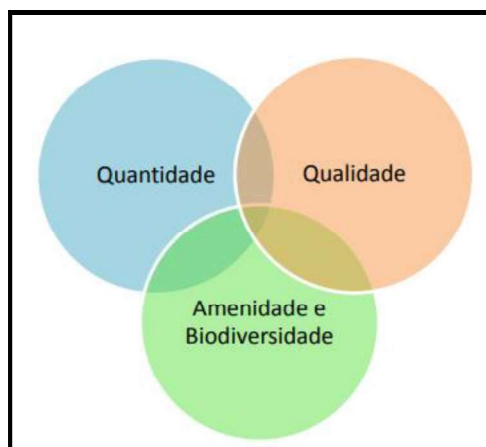
Figura 4 - Classificação das técnicas compensatórias para o manejo de águas pluviais



Fonte: Melo (2011)

As técnicas compensatórias com controle na fonte estão associadas ao armazenamento próximo à formação do escoamento direto, permitindo a utilização mais eficiente do sistema de drenagem nas áreas à jusante, além de auxiliar no controle de carga difusa na bacia hidrográfica. No que se refere ao controle na fonte localizado, destacam-se os telhados verdes ou “ecoroofs”, os microrreservatórios, os poços de infiltração e os sistemas de biorretenção, tais como biovaletas e os jardins de chuva. No que tange ao controle linear, destacam-se as trincheiras de infiltração, valas de detenção, valas de infiltração, pavimentos permeáveis e áreas úmidas lineares ou parques lineares. As técnicas SUDS foram desenvolvidas nos países do Reino Unido e têm seus objetivos baseados no tripé Quantidade, Qualidade, Amabilidade e Biodiversidade, conforme apresentado na figura 5 (LOURENÇO, 2014).

Figura 5 - Objetivos das técnicas SUDS



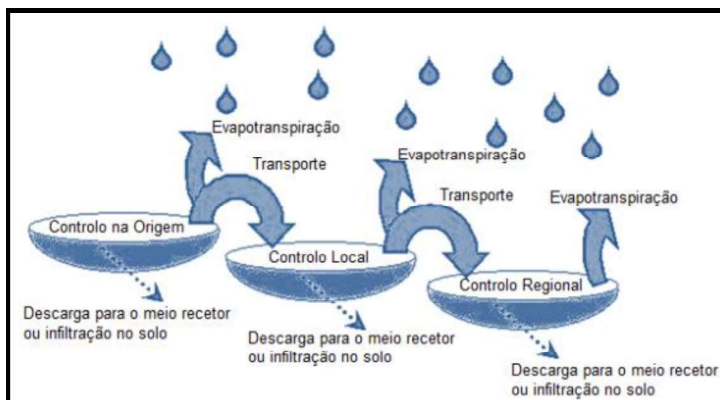
Fonte: Lourenço (2014)

Esses sistemas são projetados de forma a manter as características hidrológicas o mais próximo possível das condições de pré-urbanização. Segundo Canholi (2014), a filosofia geral aplicada ou esperada das SUDS pode ser assim resumida:

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

A cadeia de gestão do SUDS opera em série e cada elo dos níveis da cadeia de gestão reduzem o caudal e o volume do escoamento, além de melhorar a qualidade da água pluvial/afluente, conforme ilustrado na figura 6 (LOURENÇO, 2014).

Figura 6 - Cadeia de gestão do SUDS



Fonte: Lourenço (2014)

Segundo Lourenço (2014), a cadeia de gestão do SUDS pode ser definida como:

- Controle na origem: controle diretamente no local de origem e imediações, como pavimentos permeáveis, poços de infiltração e cobertura verde
- Controle local: controle que envolve vários lotes ou grandes parques de estacionamento
- Controle regional: controle de vários locais, geralmente feitos através de bacias de retenção ou wetlands.

As técnicas de medidas de controle na fonte colaboram para o desenvolvimento sustentável do sistema de drenagem. Possuem como principal função a diminuição do volume escoado, que tem como consequência menor possibilidade de inundações em centros urbanos e alivia o sistema de drenagem a jusante. (TOMINAGA, 2013).

As técnicas clássicas utilizadas em projetos de drenagem urbana possuem uma visão sanitaria, com o intuito de controlar e afastar rapidamente os deflúvios, causando geralmente impactos em áreas à jusante, na medida que se toma partido da visão do sistema de drenagem como uma alocação de espaços. Já as técnicas sustentáveis utilizadas em projetos contam com estruturas que possuem usos múltiplos, reduzindo o escoamento superficial e a poluição difusa advinda de eventos de precipitação, controlando volumes no âmbito da microdrenagem e proporcionando a melhoria da qualidade da água escoada no ambiente urbano. A figura 7 ilustra o sistema clássico de drenagem e o sistema sustentável, indicando as diferenças entre cada um.

Figura 7 – Sistemas clássicos e sustentável de drenagem



Fonte: Adaptado de Tominaga (2013)

Segundo Tominaga (2013), os sistemas clássicos têm por único propósito o controle de cheias, com retificação e isolamento de rios e altos índices de poluição. Os sistemas sustentáveis têm por propósito usos múltiplos como o controle de cheias, espaços recreacionais, diversidade biológica, rios com meandros e valorização do contato com a água, além da melhoria da qualidade da água.

As técnicas de controle na fonte podem ser divididas em medidas estruturais e não estruturais. Essas técnicas serão abordadas a seguir, especificando cada uma delas e seus exemplos que são comprovadamente eficazes.

3.7 Medidas Estruturais de Drenagem Urbana

As medidas estruturais correspondem às obras que possuem como principal objetivo a correção e prevenção dos problemas decorrentes pelas inundações no ambiente urbano. Podem ser classificadas como medidas intensivas e extensivas. São intensivas quando implicam a realização de quatro tipos de intervenções– obras que acelerem o escoamento, por exemplo, canalizações; obras responsáveis por retardar o fluxo, como é o caso dos reservatórios; restauração de calhas naturais; obras que fomentem o desvio do escoamento; e a construção de diques e polders (CANHOLI, 2014).

As medidas extensivas são responsáveis por intervenções destinadas à recomposição da cobertura vegetal, ao controle de erosão e pequenos armazenamentos. (CANHOLI, 2014). Diversas técnicas podem ser utilizadas para a realização destas intervenções, cabe ao projetista realizar o estudo adequado para determinar quais são as melhores medidas e como aplicá-las da melhor maneira possível.

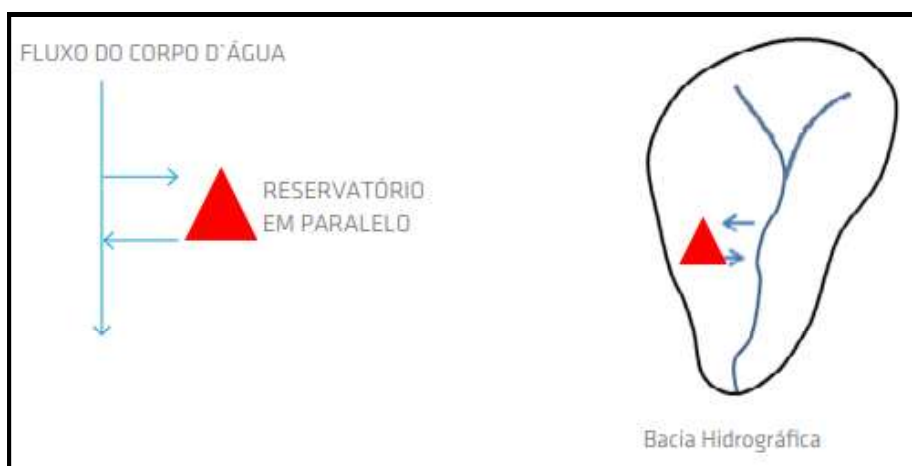
Como exemplo dessas medidas pode-se citar medidas de reservação. Essas medidas podem ser divididas em bacias de retenção e detenção, e em algumas obras podem-se ter os dois tipos de reservatórios em um mesmo ponto do sistema (CANHOLI, 2005). As estruturas que armazenam águas pluviais são classificadas quanto à sua localização em relação ao curso d'água e podem ser reservatórios *in-line* (em série) ou *off-line* (em paralelo), demonstrado nas figuras 8 e 9.

Figura 8 – Reservatórios in-line



Fonte: Programa Soluções para Cidades (2013) apud Fonseca (2018)

Figura 9 – Reservatórios off-line



Fonte: Programa Soluções para Cidades (2013) apud Fonseca (2018)

3.7.1 ***Bacias de Retenção***

Por definição uma bacia de retenção é uma estrutura artificial utilizada para reter águas pluviais ou residuais durante um período de tempo limitado. Funcionam como bacia de amortecimento para o controle quantitativo e são reservatórios de superfície, pois possui um espelho d'água permanente, que pode ser utilizado para diversos fins tais como meios de recreação, paisagismo, abastecimento de água e outros, assim como está apresentado na figura 10. (CANHOLI, 2014).

Figura 10 – Bacia de retenção

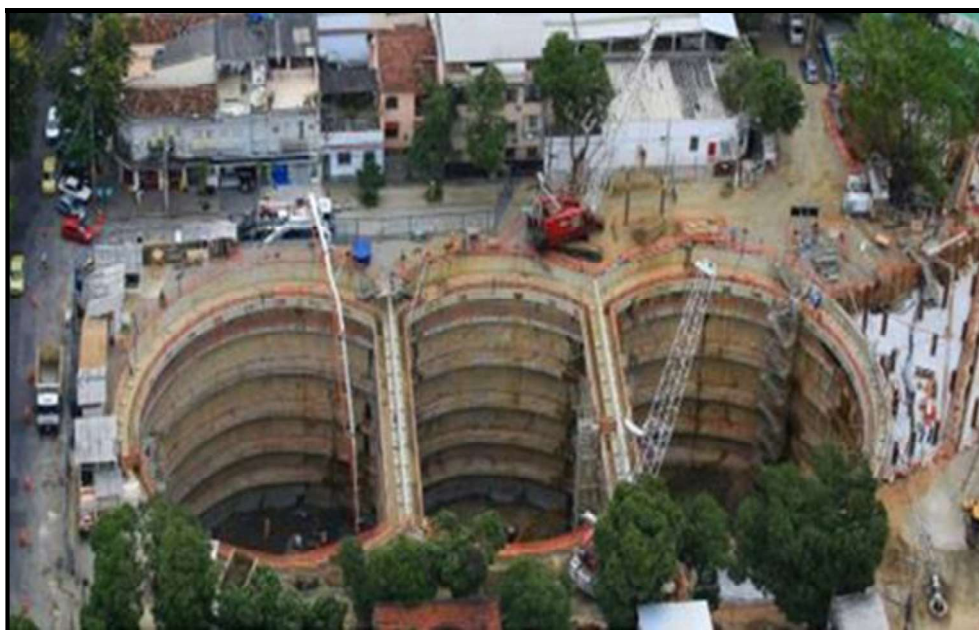


Fonte: Agriculture (1997) apud Vieira (2014)

3.7.2 ***Bacias de Detenção***

Diferentemente das bacias de retenção, as bacias de detenção são áreas destinadas para a retenção das águas superficiais durante o período chuvoso e normalmente encontram-se secas durante o período de estiagem. A redução da poluição difusa e o controle de quantidade das águas pluviais urbanas são as principais finalidades dessa estrutura (CANHOLI, 2014). Na figura 11 é possível identificar um reservatório de amortecimento de cheias na Praça Niterói, na Grande Tijuca/RJ, quando da sua construção e na figura 12 o mesmo reservatório concluído contemplando múltiplas finalidades, ou seja, a inclusão de elementos urbanísticos e atividades de lazer simultaneamente com o objetivo de detenção de águas pluviais e consequente amortecimento dos picos de vazão do hidrograma, bem como o correspondente retardo dos tempos de pico.

Figura 11 – Bacia de retenção da Praça Niterói/RJ, em fase de obras.



Fonte: Pet Eng. Civil UEM (2022).

Figura 12 – Bacia de retenção da Praça Niterói/RJ, após urbanização.



Fonte: Massa Cinzenta (2022)

3.7.3 *Trincheiras de Infiltração*

As trincheiras de infiltração possuem, como principal objetivo coletar águas superficiais de áreas adjacentes que sejam impermeáveis. São estruturas lineares que apresentam grande versatilidade, quando comparada com outras, podendo ser implantados

na superfície ou em profundidades pequenas como exemplo: ao longo do sistema viário, jardins, estacionamentos, terrenos esportivos e outros. (BAPTISTA et al, 2005).

Tucci (2016) considera uma trincheira de infiltração como uma vala escavada com pouca profundidade no qual se enche com pedra britada para garantir a captação das águas superficiais e posteriormente ocorrer a maior infiltração no solo.

O acesso das águas se dá pela superfície da trincheira ou por meio de um sistema de drenagem. Nos dispositivos de infiltração, o escoamento da água é pela própria infiltração dela no solo, e já nos dispositivos de retenção a retirada de águas é por um sistema de drenagem. Nas trincheiras que são utilizadas exclusivamente para retenção, o principal objetivo é rearranjo temporal das vazões do escoamento superficial e são feitas principalmente em solos com baixa permeabilidade ou quando há risco de contaminação de águas subterrâneas. (TOMINAGA, 2013).

A figura 13 ilustra uma trincheira de infiltração localizada em North Kingstown, nos Estados Unidos.

Figura 13 – Trincheira de infiltração



Fonte: Tominaga (2013)

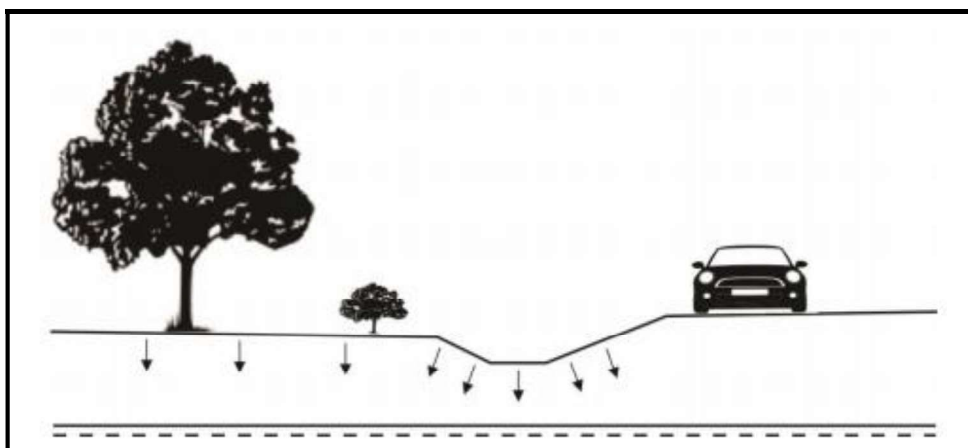
As trincheiras de infiltração e retenção possuem como maiores vantagens a criação de áreas permeáveis quando a estrutura é implantada em calçadas ou outras áreas impermeáveis, valorização do espaço urbano devido a demanda pequena de espaço que essa estrutura requer e melhoria da qualidade da água. Já as maiores desvantagens são restrição de eficiência em áreas com grandes declividades, risco de contaminação de águas

subterrâneas em trincheiras de infiltração e necessidade de manutenção periódica. (TOMINAGA, 2013).

3.7.4 ***Valas vegetadas***

São valas bastante simples de serem construídas e que são localizadas em depressões escavadas no solo que detêm as águas pluviais como solução temporária. (TOMINAGA, 2013). A figura 14 ilustra como é simples a sua construção relacionando com a localização.

Figura 14 – Localização de valas vegetadas



Fonte: Adaptado de Urbonas e Stahre (1993)

Igualmente, as trincheiras de infiltração podem ser elaboradas em locais públicos como estacionamentos, conjuntos habitacionais ou como canteiro central paralelo a ruas e estradas. Pode ser incluso simultaneamente com a função hidráulico-hidrológico e com a sustentabilidade incluindo áreas verdes.

Possui como principal objetivo a captação de águas em locais adjacentes que sejam impermeáveis como asfaltos impermeáveis, e posteriormente ocorre a infiltração ao longo dessa vala evitando inundações ao redor. Quando essa técnica atinge sua capacidade máxima de infiltração, ela começa a agir como reservatório de detenção. (TOMINAGA, 2013). A figura 15 ilustra uma vala vegetada com aspecto paisagístico com áreas verdes.

Figura 15 – Vala vegetada com áreas verdes



Fonte: Cormier e Pellegrino (2008)

Segundo Tominaga (2013), as principais vantagens dessa técnica são: detenção temporária das águas, baixos custos de projeto e construção, valorização do espaço urbano com a introdução de áreas verdes no ambiente e melhoria da qualidade das águas pluviais. Já as desvantagens são: necessidade de amplo espaço para a construção, restrição em áreas com grande declividade e possibilidade de estagnação das águas, que possui como consequência a proliferação de vetores.

3.7.5 *Poços de Infiltração*

São similares às trincheiras de infiltração, com a finalidade de maior capacidade de infiltração das águas pluviais no solo até certa profundidade. São necessários espaços com pequenas áreas, o que permite a integração dessa técnica com o ambiente natural da área a ser trabalhada. A capacidade desse sistema é pequena quando comparada a outras técnicas de controle na fonte, sendo o ideal a instalação como um complemento a outras medidas, tais como bacia de detenção, funcionando como um exutório. (BAPTISTA et al.,2005).

Essa técnica, assim como as outras, requer uma manutenção com frequência, para evitar colmatção. Possui como principais vantagens:

- Redução do volume de escoamento superficial, melhorando o sistema de drenagem a jusante;
- Melhoria da qualidade de água;

- Camadas profundas com grande capacidade de infiltração em solos pouco permeáveis.

Já as desvantagens são as restrições em áreas com declividades, risco de contaminação de águas subterrâneas e capacidade de armazenamento baixo. (TOMINAGA, 2013). A figura 16 ilustra um poço de infiltração localizado em Lyon, França.

Figura 16 – Poço de infiltração em Lyon



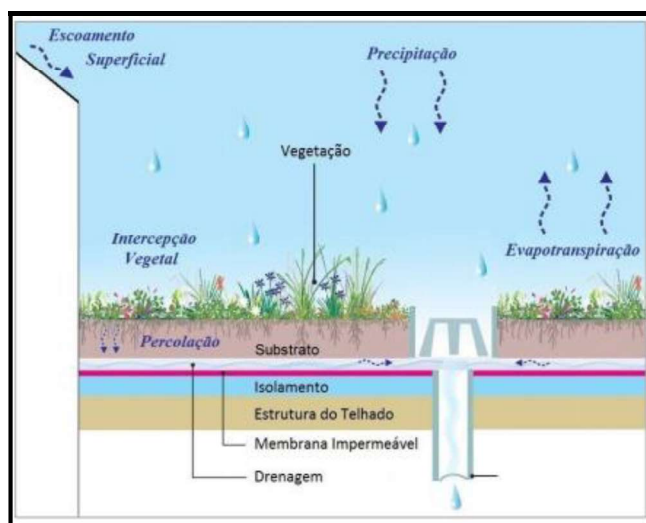
Fonte: Adaptado de Baptista et al. (2005)

3.7.6 ***Telhados Verdes***

Designado como ecoroof, greenroof, telhado vegetado ou cobertura viva, é uma técnica de controle na fonte localizada, consistindo na utilização de solo e vegetação sobre a estrutura de cobertura de edificações, promovendo a melhoria da qualidade do ar, o conforto térmico em função da diminuição da temperatura interna da edificação, além da redução do escoamento superficial. Segundo Hydrotec Membrana Corporation (2007, apud TASSI et al., 2014), os telhados verdes podem ser concebidos com diferentes conceitos, com relação ao tipo de uso previsto e de vegetação.

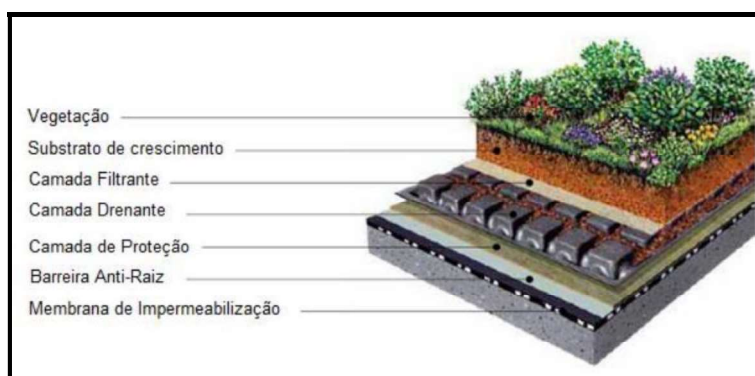
O modelo de estrutura de um telhado verde consiste em uma laje, uma camada impermeabilizante, de forma a evitar a infiltração de água; uma geomanta que impede a passagem do substrato e regulando a retenção de água. As figuras 17 e 18 ilustram o funcionamento e os elementos componentes de um telhado verde, respectivamente.

Figura 17 – Funcionamento de um telhado verde



Fonte: Modificado de Portland (2009)

Figura 18 – Elementos componentes de um telhado verde



Fonte: Lourenço (2014)

A prática de utilização de telhados verdes confere benefícios e uma forma significativa de melhora da qualidade ambiental, podendo também ser usado como redutor de poluentes. (YANG; YU; GONG, 2008).

Os telhados verdes podem ser classificados em duas categorias: os sistemas extensivos e sistemas intensivos. Os sistemas extensivos contemplam coberturas leves e são projetados para utilizar vegetação mais resistente e em situações climáticas adversas, conforme figura 19. Os telhados da classe extensiva possuem, como principais funções, a atenuação do efeito de ilhas de calor e a redução do escoamento das águas pluviais. A profundidade do solo é menor (5cm a 15cm), fato que reduz o peso sobre o telhado,

diferentemente dos telhados intensivos. Normalmente o custo de implantação e a necessidade de manutenção são menores do que os sistemas intensivos.

Os telhados verdes intensivos devem ser instalados após estudo, em função do peso e da maior profundidade do solo, podendo contemplar vegetação de maior porte, tais como árvores e arbustos, conforme figura 20. São utilizados para a recreação, ou seja, lazer (jardins naturais). A camada drenante é mais profunda (15 cm a 90 cm) e são usadas plantas de maior porte e com uma variedade grande. Essa classe exige uma maior manutenção regular devido ao peso que vegetação faz sobre o telhado e baixas declividades (2,5 a 3,0%).

Figura 19 – Telhado verde extensivo



Fonte: Zinco Brasil (2019)

Figura 20 – Telhado verde intensivo



Fonte: UOL (2015)

Segundo Tassi et al. (2014), um telhado verde contempla a seguinte estrutura:

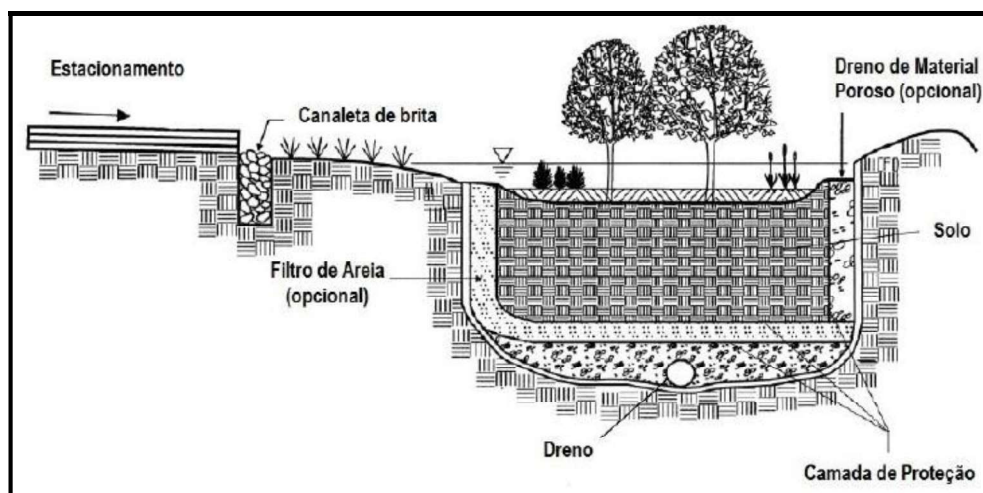
- Camada de vegetação: a cobertura vegetal deve ser adequada às condições climáticas do local. A vegetação intercepta uma parcela da chuva, evitando que ela atinja o solo. É por meio do processo de evapotranspiração que a água é perdida para a atmosfera e o potencial de retenção de água no substrato é aumentado. Adicionalmente, a vegetação retarda o escoamento superficial, que passa a ocorrer quando o substrato atinge a saturação;
- Substrato: é constituído pela camada de solo, servindo de suporte para a fixação da vegetação, fornece água e nutrientes necessários para a manutenção desta. Essa camada é igualmente importante para o armazenamento temporário da água durante os eventos chuvosos;
- Geotêxtil: constitui uma camada filtrante que separa as camadas de vegetais e substrato da camada drenante. Ela evita a migração de partículas do substrato para o interior da camada drenante, reduzindo a funcionalidade do telhado verde;
- Camada de drenagem: em telhados praticamente horizontais, como é o caso dos telhados verdes, é fundamental a existência da camada de drenagem, para evitar alagamentos indesejáveis e estresse da cultura. Além disso, a camada de drenagem atua retendo parte da água da chuva, necessária para a vegetação durante períodos de estiagem;
- Camada protetora: destina-se à retenção da umidade e nutrientes acima da estrutura do telhado, fornecendo proteção física para a membrana de impermeabilização contra o crescimento das raízes da vegetação;
- Impermeabilização: normalmente realizada com o emprego de hidrorrepelentes, de maneira a evitar o contato da água com a estrutura do telhado;
- Estrutura do telhado: deve suportar toda a carga do telhado verde. Para o sistema extensivo com substrato de 5 cm a 15 cm de espessura, estima-se que a carga sobre o telhado possa aumentar de 70 a 170 kg/m² aproximadamente. Para o sistema intensivo, com espessura de solo acima de 15 cm, o valor de carga adicional pode variar entre 290 e 970 kg/m².

3.7.7 *Jardins de Chuva*

A partir da atividade biológica dos micro-organismos e plantas, os jardins de chuva possuem como principais objetivos limpar as águas do escoamento superficial e contribuir para evitar cheias através da infiltração, com diminuição do volume escoado. (TOMINAGA, 2013).

São estruturas pouco profundas, portanto seu uso é principalmente em estacionamentos, vias públicas aérea, residenciais e comerciais. Quando utilizada em maiores áreas aumentam as possibilidades de colmatção. Trata-se de um armazenamento temporário de águas de escoamento superficial, no qual esta é infiltrada na estrutura. Já os poluentes são removidos por adsorção, filtração, troca de íons, volatilização e decomposição. (TOMINAGA, 2013). A figura 21 ilustra a estrutura de um jardim de chuva em área de estacionamento. A figura 22 ilustra o primeiro jardim de chuva em área pública na cidade do Rio de Janeiro, localizado em Copacabana.

Figura 21 – Estrutura de um jardim de chuva em área de estacionamento



Fonte: Mde (2000), apud Tominaga (2013)

Figura 22 – Jardim de chuva localizado no bairro de Copacabana, Rio de Janeiro/RJ



Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (2021)

Os jardins de chuva possuem como principais vantagens:

- Aplicação em áreas densamente permeabilizadas (estacionamentos e calçadas);
- Valorização do espaço, devido à introdução das plantas no meio urbano;
- Detenção temporária das águas;
- Melhoria da qualidade das águas pluviais, devido a retenção de sedimentos e poluentes.

Já os principais pontos negativos dessa estrutura são:

- Inviável o uso em grandes áreas de contribuição;
- Custo de construção maior que outras medidas de controle;
- Suscetível ao fenômeno de colmatção, necessitando de um pré-tratamento.

3.7.8 Pavimentos Permeáveis

Os pavimentos permeáveis têm como sua principal finalidade a redução do escoamento superficial devido a espaços vazios em sua estrutura, permitindo que a água tenha capacidade de escoamento maior e com rapidez através da infiltração no solo ou por drenagem auxiliar, fato que pode contribuir para o sistema de drenagem de uma cidade, amenizando e reduzindo a probabilidade de alagamentos no âmbito da microdrenagem urbana.

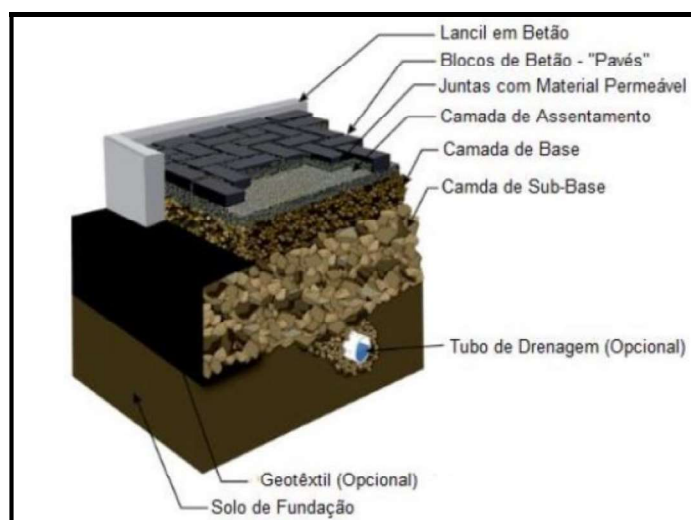
Segundo Barros e Boaventura (2019), os pavimentos permeáveis surgem como alternativa para reduzir os impactos da impermeabilização dos solos nos centros urbanos.

Estes podem ser aplicados como passeios, calçadas, estacionamentos, pátios residenciais, comerciais e industriais, vias de tráfego leve, ou seja, para utilidades onde não há grande solicitação de carga.

O pavimento permeável é um dispositivo que possibilita a infiltração, onde o escoamento das águas pluviais é conduzido, através de uma superfície permeável, a um reservatório de pedras localizado abaixo da superfície do terreno (URBONAS e STHARE, 1993).

O conceito de pavimentos permeáveis surgiu na década 1970 no Frankliln Institute, localizada na Filadélfia - EUA e podem ser construídos em asfalto ou concreto. (TOMAZ, 2009, apud SANTOS, 2017). Esses pavimentos permitem a drenagem de águas pluviais através da camada superior, para a camada subjacente, local onde a água é armazenada até se infiltrar no solo ou ter outro destino, como ser reutilizada (LOURENÇO, 2014). A figura 23 apresenta a seção transversal típica de um pavimento permeável.

Figura 23 – Seção Transversal Típica de um pavimento permeável



Fonte: Lourenço (2014)

Os pavimentos permeáveis podem ser classificados segundo a composição e segundo a infiltração. É importante conhecer as características de cada classificação para decidir o tipo correto que será aplicado, devido as características do local.

Os pavimentos permeáveis são compostos por duas camadas de agregados, sendo uma de agregado fino ou médio e outra de agregado graúdo, mais a camada do pavimento permeável propriamente dito. Assim sendo, são tipicamente formados por três camadas,

sendo a primeira composta pelo pavimento permeável, a segunda pelo filtro, formado por agregados finos ou médios, e a terceira pelo reservatório de agregados graúdos.

O escoamento infiltra na capa ou revestimento poroso, com espessura variando de 5 cm a 10 cm, para posterior passagem por filtro de agregado de 1,25 cm de diâmetro e espessura aproximada de 2,5 cm, e posterior passagem por reservatório de pedras mais profundo com agregados de 3,8 a 7,6 cm de diâmetro. O escoamento, neste reservatório, poderá então ser infiltrado para o subsolo ou ser coletado por tubos de drenagem e posteriormente transportado para uma saída. A capacidade de armazenamento dos pavimentos porosos é determinada pela profundidade do reservatório de pedras subterrâneo, bem como deve-se incluir o escoamento perdido por infiltração para o subsolo (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUND, 2000).

Urbonas e Stahre (1993) classificam os pavimentos permeáveis basicamente em três tipos: pavimento de asfalto poroso; pavimento de concreto poroso e pavimento de blocos de concreto vazado preenchido com material granular. A camada superior dos pavimentos é construída de forma similar aos pavimentos convencionais, entretanto com retirada da fração da areia fina da mistura dos agregados do pavimento. Os blocos de concreto vazados são colocados acima de uma camada de base granular. Filtros geotêxteis são colocados sob a camada de areia fina para prevenir a migração da areia fina para a camada granular.

3.7.8.1 Pavimento de Asfalto Poroso

A camada superior do asfalto poroso difere-se do asfalto convencional por um simples componente: não possui camada de areia fina da mistura dos agregados do pavimento, e como consequência é conhecida como camada porosa de asfalto (CPA). Essa mistura asfáltica possui vazios entre 18% e 25%, o que causa benefícios como: percolação da água com maior rapidez, maior aderência pneu-pavimento quando comparada ao asfalto convencional, e diminuição de ruídos. (BERNUCCI et. al., 2008). A figura 24 ilustra a permeabilidade do asfalto poroso.

Um dos pavimentos porosos desenvolvidos em um dos estacionamentos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo é uma mistura entre o concreto asfáltico comum e vários aditivos que permitem que sejam mantidos espaços, como poros, na superfície. Dessa maneira, a água proveniente das chuvas é absorvida por esses poros e acabam sendo retidas, por algumas horas, entre as pedras que constituem a base de espessura de 35 centímetros. (IBDA FÓRUM DA CONSTRUÇÃO, 2022).

Figura 24 – Permeabilidade do asfalto poroso

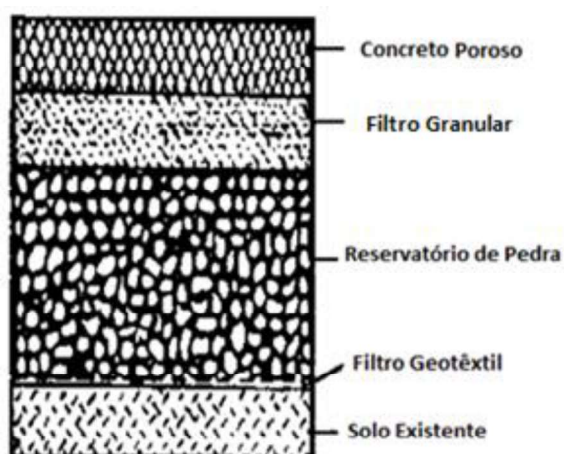


Fonte: Gonçalves e De Oliveira (2010)

3.7.8.2 **Pavimento de Concreto Poroso**

Os pavimentos de concreto poroso são indicados para um tráfego leve ou médio, pois possui uma menor resistência quando comparada ao concreto comum. Segundo Gonçalves e De Oliveira (2010) os pavimentos de concreto poroso podem ter vazios entre 15% e 25% de sua composição. Em relação a sua composição, é similar ao asfalto poroso, modificando apenas para o concreto, como ilustra a figura 25.

Figura 25 – Composição do concreto poroso

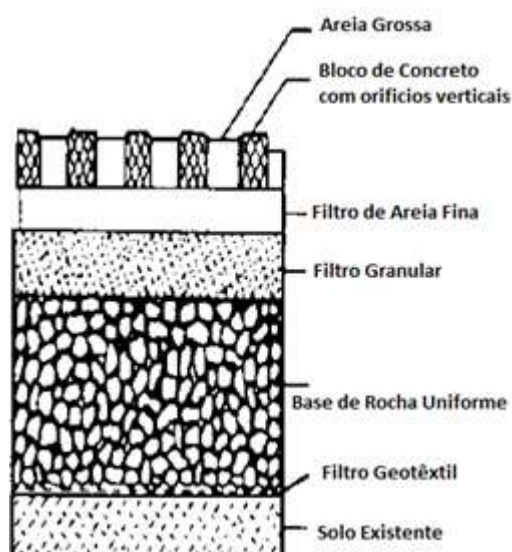


Fonte: Adaptado de Araújo et.al.(2000)

3.7.8.3 Pavimento de bloco de Concreto Vazado

Estes pavimentos devem ser colocados acima de um material granular, e ser preenchido com grama ou outros tipos de vegetações rasteiras. Os filtros geotêxteis deverão ser colocados sob a camada de areia fina para que não ocorra uma “invasão” da areia fina na camada granular inferior, o que pode acarretar em um péssimo funcionamento do sistema de drenagem. (GONÇALVES e DE OLIVEIRA, 2010). As figuras 26 e 27 demonstram, respectivamente, a composição do bloco de concreto vazado e a aplicação de tal em um estacionamento.

Figura 26 – Composição do bloco de concreto vazado



Fonte: Adaptado de Araújo et.al.(2000)

Figura 27 – Aplicação do bloco de concreto vazado em um estacionamento



Fonte: Gonçalves e De Oliveira (2010)

3.7.8.4 Vantagens e Desvantagens dos Pavimentos Permeáveis

Segundo Lourenço (2014), entre as vantagens apresentadas pelos pavimentos permeáveis, destaca-se a flexibilidade para espaços pequenos, a grande eficiência quanto à infiltração do escoamento superficial e a redução da área impermeável. Como desvantagem, há a manutenção exigente, maior vulnerabilidade de erosão e risco de contaminação de aquíferos.

De acordo com Tominaga (2013), os pavimentos porosos possuem vantagens significativas quando comparados às outras técnicas de controle na fonte. Porém, também há limitações que estão expostas a seguir:

Vantagens:

- Detenção temporária das águas;
- Melhoria da qualidade das águas por filtração no corpo do pavimento;
- Segurança e conforto para motoristas devido à redução de água acumulada na pista;
- Redução ou eliminação dos custos de implantação de um sistema de drenagem tradicional;
- Não precisam de espaços específicos para a implantação.

Desvantagens:

- Pode ocorrer contaminação de águas subterrâneas;
- Necessária mão de obra especializada para implantação;
- Manutenção periódica com intuito de evitar entupimento e a colmatção dos poros;
- Custo elevado quando ocorre colmatção.

3.7.9 Benefícios na implantação de medidas de controle na fonte

Além da eficiência no controle de cheias – principalmente no meio urbano – as medidas de controle na fonte podem trazer outros benefícios. A remoção de poluente é outro exemplo de benefícios que as técnicas de controle na fonte podem possuir, como sólidos suspensos totais (SST), fósforo (P), nitrogênio (N) e metais, elementos que são presentes na água do escoamento superficial e se encontram na tabela 4, relacionando o tipo de medida de controle na fonte com a eficácia na remoção de poluentes. (TOMINAGA, 2013).

Tabela 4 – Eficiência na remoção de poluentes

Medida de controle na fonte	Efeito de Controle de cheias	Eficiência na remoção de poluentes		
		¹ SST*	² P e ³ N	Metais
Trincheiras de infiltração e detenção	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial gerado em área adjacente	Alta	Alta	Alta
Valas vegetadas	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial gerado em área vizinha	Alta	Média	Alta
Poços de infiltração	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial gerado na área contribuinte ao poço	-	-	-
Telhados verdes	Retardo do escoamento pluvial da própria edificação	Alta	Alta	Alta
Jardins de chuva	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial gerado em área vizinha	Alta	Alta	Alta
Pavimentos porosos	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial gerado pelo pavimento ou áreas externas	Alta	Alta	Alta

¹SST – Sólidos suspensos totais; ²P – Fósforo; ³N – Nitrogênio

Fonte: Adaptado de Suderhsa (2002), Metropolitan Council (2001)

3.8 Medidas Não Estruturais de Drenagem Urbana

As medidas não estruturais, quando colocadas corretas no cenário atual podem ser eficazes a custos mais baixos e com horizontes mais longos de atuação. As ações não estruturais procuram conscientizar a população em relação a disciplinar a ocupação territorial, o comportamento de consumo e as atividades econômicas. Entre as ações mais adotadas, pode-se citar: ações de regulamentação do uso e ocupação do solo, educação ambiental voltada ao controle da poluição difusa, erosão e lixo, seguro-enchente, sistemas de alerta e previsão de inundações. Segundo Barbosa (2006) apud Machado e Poleza (2017):

As medidas não estruturais defendem na sua concepção a melhor convivência da população com as cheias. Não são projetadas para dar proteção completa, já que para isso teria que prever o maior evento possível o que não é uma tarefa fácil e nem confiável. (Barbosa apud Machado e Poleza, 2017).

Portanto, é preciso que os órgãos responsáveis façam ações, principalmente marketing, que possuam como objetivo principal alterar o comportamento da população em relação à ocupação territorial, comportamento de consumo e atividades econômicas.

3.9 Resiliência Urbana no Manejo de Águas Pluviais

A resiliência urbana refere-se à persistência dos sistemas naturais frente às mudanças nas variáveis do ecossistema devido a causas naturais ou antropogênicas. Segundo DONG et. al. (2017), considerando as recentes mudanças climáticas, a adaptação e implementação de sistemas SUDS associados a um planejamento e gestão integrados podem aumentar a resiliência, tornando-se cada vez mais importantes para manter as cidades habitáveis em longo prazo.

Segundo IPCC (2014), os fenômenos das alterações climáticas manifestam-se no aumento da temperatura, da intensidade de precipitação e do nível médio da água do mar e têm impacto nos sistemas de drenagem. Segundo Macedo (2017), os sistemas de drenagem, dimensionados com base em registos históricos, podem não ter capacidade para situações futuras, sendo necessário proceder à implementação de medidas de adaptação, incluindo a beneficiação das infraestruturas existentes com vista ao incremento da resiliência urbana.

A resiliência implica robustez do sistema e flexibilidade de resposta, que pode ser medida com base no desempenho do sistema/cidade (MACEDO, 2017). Durante uma variação do estado natural de um sistema, a robustez consiste em apropriar até onde é possível suportar esta variação. Após a perturbação, o sistema estabiliza novamente e a velocidade a que este processo de equilíbrio ocorre refere-se à flexibilidade de resposta.

“As cidades precisam se adaptar às mudanças climáticas para se tornarem resilientes aos impactos ambientais. As questões ambientais, como a conservação das áreas verdes, o uso adequado do solo e da água e melhores condições do ar, levando em consideração o transporte limpo, são pontos primordiais para o planejamento urbano sustentável. Todos devem ser reunidos em um plano integrado de infraestrutura verde – um meio de recuperar o ambiente urbano e melhorar a qualidade de vida da população atual, assim como das gerações futuras sem agredir o ambiente natural” (BUENO; XIMENES, 2011).

Em um enfoque holístico, as técnicas compensatórias de drenagem urbana com controle na fonte associam-se à resiliência urbana, principalmente no que tange à infraestrutura e ao ambiente social, à medida que ajustes nos sistemas naturais podem ser implementados em resposta à ocorrência ou expectativa de impactos climáticos. Neste contexto, os telhados verdes absorvem parte da radiação solar, emitindo menor quantidade de calor para a atmosfera, reduzindo a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar, além da redução de deflúvios no âmbito da microdrenagem urbana. No que se referem ao controle linear, os pavimentos permeáveis enquadram-se em um contexto de projeto de infraestrutura verde com a redução do escoamento superficial e a redução de poluentes de origem pluvial, como elementos que promovem a resiliência urbana no âmbito das mudanças climáticas.

A avaliação da resiliência de forma quantitativa permite atestar o comportamento de desempenho do sistema de drenagem durante condições de alagamentos (TAVARES, et al., 2019). Segundo Mugume et al (2014), apud Tavares et. al. (2019), o índice de resiliência operacional, *Reso*, pode ser estimado através do volume total de inundação no nó e da duração média da inundação no nó, conforme equação (12).

$$Reso = 1 - \left(\frac{VTF}{VTI} \times \frac{tf}{tn} \right) \quad (12)$$

Onde:

- *Reso*: índice de resiliência operacional;
- VTF: volume total de inundação no nó;
- VTI: volume total de entrada no nó;
- *tf*: duração média da inundação nodal;
- *tn*: tempo total decorrido de simulação.

O índice de resiliência operacional *Reso* varia de 0 a 1; sendo que 0 indica o nível mais baixo de resiliência e 1 a resiliência de nível mais alto, referente aos nós que sofreram alagamentos. Segundo Mugume et al (2015), a resiliência de 0,7 representa um nível mínimo aceitável de proteção contra inundação.

4 MODELO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO SWMM

O modelo *Storm Water Management Model* (SWMM), foi desenvolvido pela U. S. *Environmental Protection Agency* (US EPA) e possui como principal objetivo a gestão da drenagem urbana, simulado em diferentes cenários, no qual acompanha-se a quantidade de escoamento dentro de cada sub-bacia durante um tempo de simulação, sendo considerados:

- Percolação da água infiltrada nas camadas dos aquíferos;
- Troca de fluxo entre os aquíferos e o sistema de drenagem;
- Modelagem do fluxo superficial por meio de reservatórios não-lineares;
- Captação e retenção das precipitações e dos escoamentos em diversos dispositivos de baixo impacto;
- Precipitações variáveis no tempo.

Os quatro principais módulos desse modelo computacional são: transporte hidráulico, que é aplicado em canais e condutos, superfícies terrestres, aplicado em escoamento e infiltração, além dos módulos de águas subterrâneas e atmosférico.

No modelo hidrológico-hidráulico SWMM, as sub-bacias são tratadas como reservatórios não-lineares, sendo que o escoamento superficial por unidade de área ocorre apenas quando a altura de água, no reservatório, excede o armazenamento de depressão máxima dp, conforme figura 28 (ROSSMAN, 2010). O SWMM apresenta valores referentes à quantidade e à qualidade do escoamento gerado em cada sub-bacia, bem como as taxas de fluxo, profundidade e qualidade da água nas tubulações ou canal durante o período da simulação. O SWMM pode modelar técnicas sustentáveis de baixo impacto em manejo de águas pluviais, tais como: bacia de biorretenção, jardim de chuva, telhado verde, trincheira de infiltração, pavimento permeável, barris de chuva, vala de infiltração.

Sf: perda de carga unitária., em m/m.

A equação da quantidade de movimento pode ser avaliada em cinco termos, da seguinte forma:

$\frac{\partial Q}{\partial t}$	Inércia local;
$\frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x}$	Inércia advectiva;
$gA \frac{\partial y}{\partial x}$	Força de pressão;
gAS_0	Força de peso;
gAS_f	Força de atrito.

Segundo Fan et al. (2014), estudos mostram que, na maioria dos casos de uso das equações, os termos referentes à força de pressão, inércia advectiva e inércia local são muito inferiores aos termos referentes às forças de peso e atrito, especialmente em canais com declividade alta. Nestes casos pode ser adotada uma aproximação das equações de Saint-Venant, que contempla as equações da continuidade e da quantidade de movimento, desprezando-se, nesta última, os termos referentes à força de pressão, inércia advectiva e inércia local, obtendo-se a equação (15).

$$gAS_0 - gAS_f = 0 \quad (15)$$

Onde:

gAS_0	Força de peso;
gAS_f	Força de atrito.

As equações (13) e (15) dão origem ao modelo de propagação de onda cinemática, utilizado para avaliação do sistema de galeria de águas pluviais da área objeto do capítulo 5.

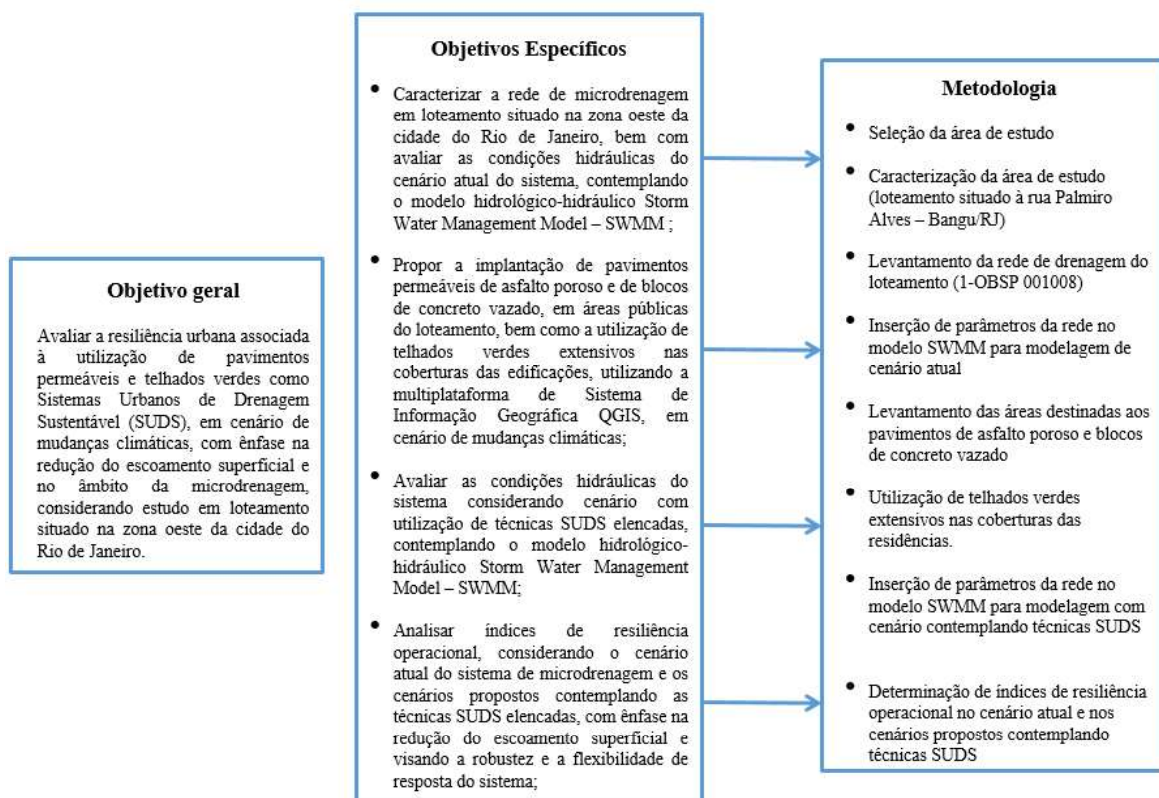
5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do estudo é apresentado o fluxograma metodológico da figura 29, o qual detalha as etapas da pesquisa visando alcançar os objetivos geral e específicos do trabalho.

Foram contemplados cenários de simulação a partir da utilização do modelo hidrológico-hidráulico SWMM, de forma a determinar os índices de resiliência operacional, tanto no cenário atual como nos cenários propostos, caracterizados da seguinte forma:

- Cenário atual – Cenário das condições atuais de pavimentação do leito carroçável do logradouro, em asfalto convencional de concreto betuminoso usinado a quente, e das calçadas, em passeio cimentado, bem como a cobertura das residências com telhados convencionais;
- Cenário proposto – Cenário das técnicas compensatórias de pavimentação do leito carroçável do logradouro, em asfalto poroso, e das calçadas, em blocos de concreto vazado, bem como a previsão de aproximadamente 70% da área de cobertura das residências com telhado verde extensivo;
- Cenário proposto com índice de resiliência operacional igual a 1 - Cenário das técnicas compensatórias de pavimentação do leito carroçável do logradouro, em asfalto poroso, e das calçadas, em blocos de concreto vazado, bem como a previsão de implantação de cobertura das residências com telhado verde extensivo, de forma a alcançar o índice de resiliência operacional igual a 1 em todos os poços de visita da rede de drenagem do loteamento.

Figura 29 – Fluxograma metodológico da pesquisa



Fonte: Autor (2023)

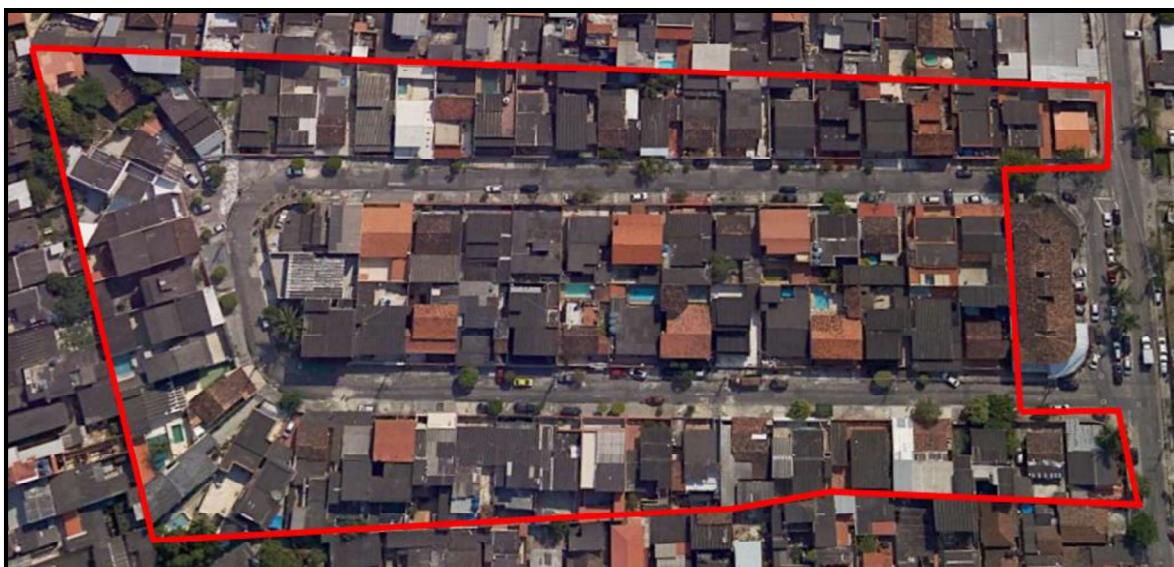
No que se refere ao levantamento das coberturas das residências do loteamento, foram elencadas as seguintes considerações:

- Contemplar a previsão de aproximadamente 70% da área total das mesmas com implantação de telhado verde extensivo;
- Contemplar a implantação de telhado verde extensivo visando atingir o índice de resiliência operacional igual a 1,0 em todos os poços de visita da rede de microdrenagem do loteamento.

5.1 Caracterização da Área Selecionada

Em um estudo específico, será analisado o cadastro de galerias de águas pluviais em loteamento residencial no bairro de Bangu, situado à rua Palmiro Alves, zona norte da cidade do Rio de Janeiro, que está ilustrado na figura 30.

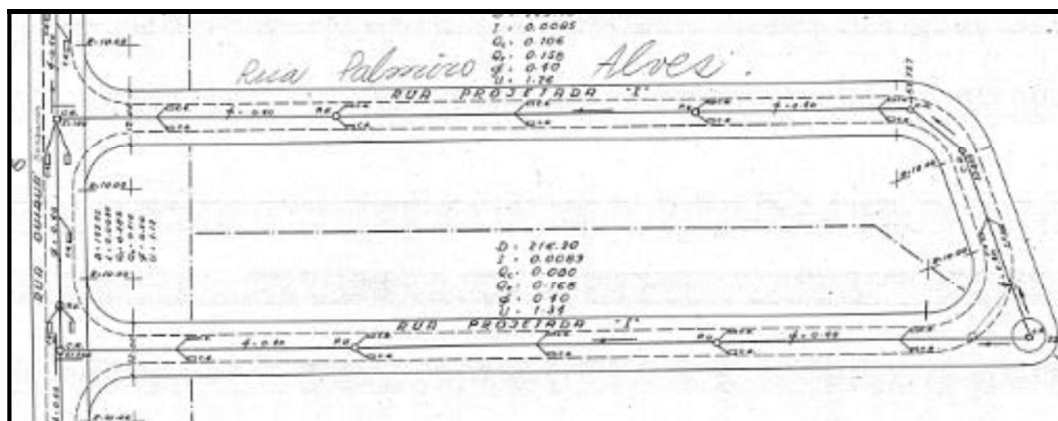
Figura 30 – Área de Estudo



Fonte: Adaptado de *Google Earth* (2023)

A escolha da área de estudo justifica-se pelas características fisiográficas do loteamento, que contempla casas de um e 2 pavimentos, com via de acesso estritamente local e de predominância exclusiva de moradores e visitantes, apresentando baixa fluidez de tráfego, em asfalto não poroso e calçadas em passeio cimentado, em sua maioria. Trata-se de rede de microdrenagem que contribui para a bacia hidrográfica do rio das Tintas, sendo um curso d'água que atualmente apresenta uma calha com seção hidráulica insuficiente em eventos de chuvas intensas. Foi utilizado o documento nº 1-OBSP001008, referente ao cadastro da área do loteamento, constante do acervo técnico da Fundação Rio-Águas, conforme figura 31.

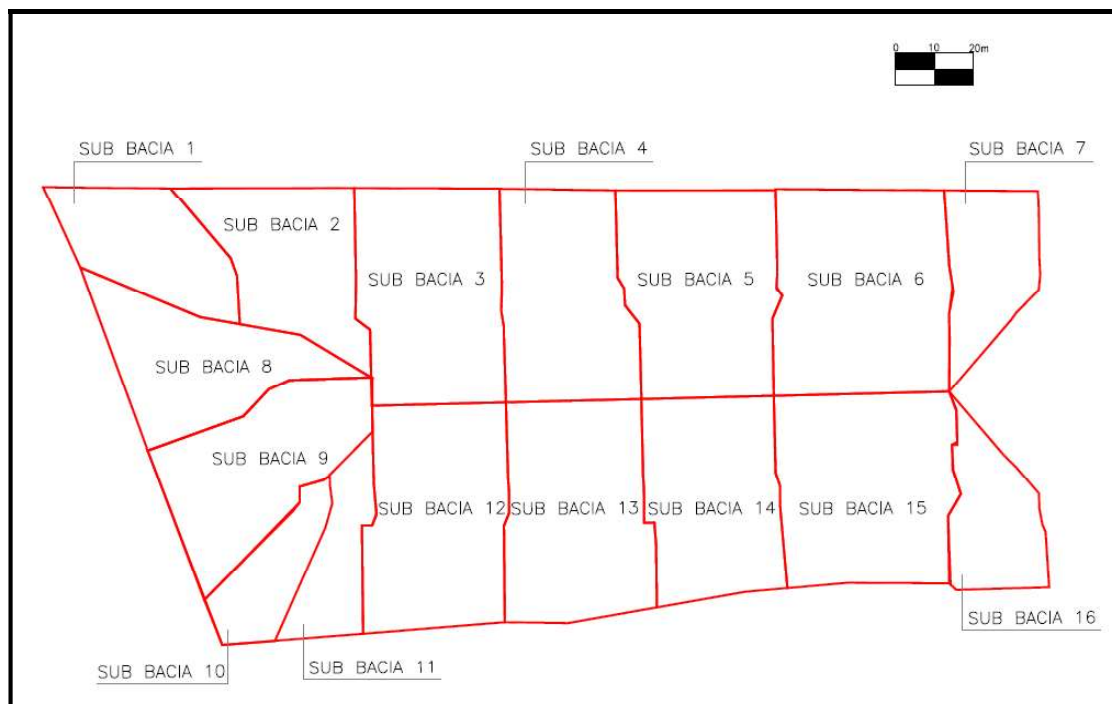
Figura 31 – Documento 1-OBSP001008



Fonte: Acervo Técnico da Fundação Rio-Águas

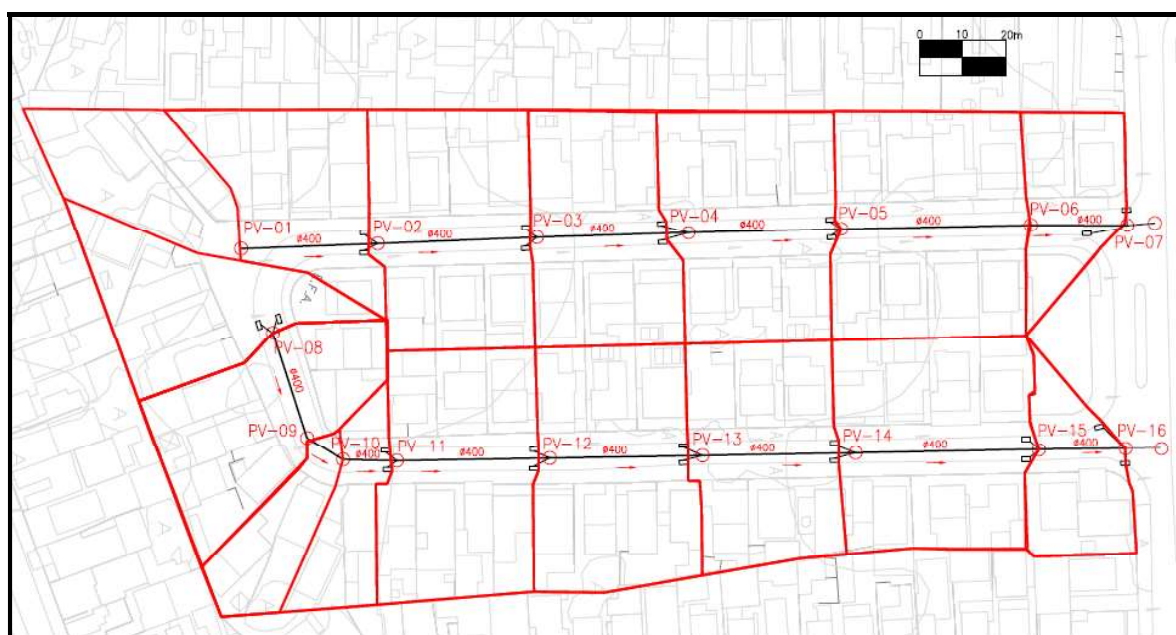
Foram traçadas as bacias locais contribuintes às captações de cada poço de visita, separando-as por áreas, de forma a analisar o cadastro da rede de águas pluviais do loteamento, conforme figuras 32 e 33, respectivamente.

Figura 32 – Divisão de áreas das bacias locais do loteamento



Fonte: Autor (2023)

Figura 33 – Bacias locais com a inclusão do cadastro da rede de drenagem



Fonte: Autor (2023)

Os quadros 05 e 06 possuem as características das sub-bacias e da rede de drenagem no local estudado. Para a simulação dos cenários atual e futuro com implantação de técnicas compensatórias, foi considerado, inicialmente, o intervalo de 7 dias antecedentes de tempo seco.

Quadro 5 – Características das sub-bacias e rede de drenagem (PV-01 até PV-07)

Características das sub-bacias e da rede de drenagem correspondente						
Sub-bacia	Exultório	Área (ha)	Área Urbana (m²)	CN médio	Trecho de rede correspondente	Declividade do trecho de rede (m/m)
S1	N1	0,11	1081,00	80	N1-N2	0,0089
S2	N2	0,14	1406,00	80	N2-N3	0,0089
S3	N3	0,20	2022,00	80	N3-N4	0,0089
S4	N4	0,18	1752,00	80	N4-N5	0,0089
S5	N5	0,20	2034,00	80	N5-N6	0,0089
S6	N6	0,23	2340,00	80	N6-N7	0,0089
S7	N7	0,09	885,00	80	N7-Exutório	0,0089

Fonte: Autor (2023)

Quadro 6 – Características das sub-bacias e rede de drenagem (PV-08 até PV-16)

Características das sub-bacias e da rede de drenagem correspondente						
Sub-bacia	Exultório	Área (ha)	Área Urbana (m²)	CN médio	Trecho de rede correspondente	Declividade do trecho de rede (m/m)
S8	N8	0,14	1449,00	80	N8-N9	0,0085
S9	N9	0,17	1667,00	80	N9-N10	0,0085
S10	N10	0,06	645,00	80	N10-N11	0,0085
S11	N11	0,07	661,00	80	N11-N12	0,0085
S12	N12	0,20	2041,00	80	N12-N13	0,0085
S13	N13	0,21	2055,00	80	N13-N14	0,0085
S14	N14	0,17	1741,00	80	N14-N15	0,0085
S15	N15	0,22	2189,00	80	N15-N16	0,0085
S16	N16	0,09	854,00	80	N16-N17	0,0085

Fonte: Autor (2023)

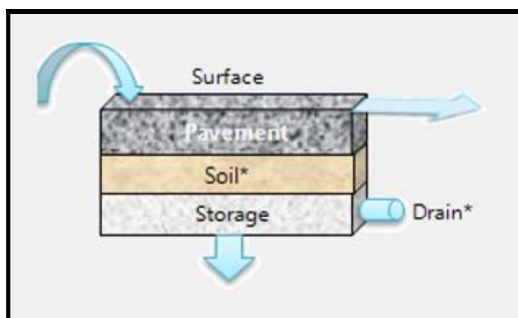
5.2 Parâmetros de Entrada para as Técnicas Compensatórias

A definição dos parâmetros e dados contemplados nas simulações com pavimentos de asfalto poroso e blocos de concreto vazado, bem como cobertura de telhado verde extensivo, no modelo hidrológico-hidráulico, utilizou, como referência, trabalhos de Nunes et al (2017), Virgiliis (2009), Pinto (2011), Ferreira (2017) e Rossman (2015).

5.2.1 Parâmetros para o Pavimento Permeável

Considerando-se o modelo SWMM, a figura 34 ilustra as camadas de um pavimento permeável para a inserção de parâmetros.

Figura 34 – Camadas do pavimento permeável



Fonte: SWMM (2022)

As tabelas 05 e 06 apresentam os parâmetros de entrada que foram utilizados para a simulação dos cenários com técnicas compensatórias para o asfalto poroso e bloco de concreto vazado, respectivamente.

Tabela 5 – Parâmetros de entrada do asfalto poroso

Superfície		Pavimento		Armazenamento	
Profundidade de armazenamento (mm)	1,905	Espessura (mm)	40	Altura (mm)	350
Coefficiente de manning	0,015	Índice de vazios	0,25	Índice de vazios	0,75
Declividade (%)	5	Permeabilidade (mm/h)	5760	Taxa de infiltração (mm/h)	200
Fração do volume utilizado na vegetação	0,1				

Fonte: Autor (2023)

Tabela 6 – Parâmetros de entrada do bloco de concreto vazado

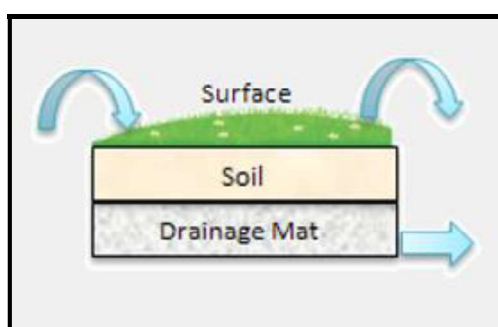
Superfície		Pavimento		Armazenamento	
Profundidade de armazenamento (mm)	1,905	Espessura (mm)	80	Altura (mm)	500
Coefficiente de manning	0,015	Índice de vazios	0,2	Índice de vazios	0,75
Declividade (%)	5	Permeabilidade (mm/h)	12240	Taxa de infiltração (mm/h)	200
Fração do volume utilizado na vegetação	0,5				

Fonte: Autor (2023)

5.2.2 Parâmetros do Telhado Verde

Considerando-se o modelo SWMM, a figura 35 ilustra as camadas de um telhado verde para a inserção de parâmetros.

Figura 35 – Camadas do telhado verde



Fonte: SWMM (2023)

A tabela 07 apresenta os parâmetros de entrada que foram utilizados para a simulação dos cenários com técnicas compensatórias para o telhado verde.

Tabela 7 – Parâmetros de entrada do telhado verde

Superfície		Solo		Camada de Drenagem	
Profundidade de armazenamento (mm)	10	Espessura (mm)	30	Espessura (mm)	10
Coefficiente de manning	0,24	Porosidade	0,45	Fração de vazios	0,6
Declividade do telhado (%)	1	Condutividade hidráulica (mm/h)	11	Coefficiente de rugosidade	0,4
Fração do volume utilizado na vegetação	0,1	Gradiente de condutividade	10		
		Sucção capilar (mm)	110		

Fonte: Autor (2023)

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Cenário Atual

Considerando-se o cenário contemplando as condições atuais de pavimentação do leito carroçável do logradouro, em asfalto convencional de concreto betuminoso usinado a quente, e das calçadas, em passeio cimentado, bem como a cobertura das residências com telhados convencionais, os quais geram escoamento superficial direto, foram obtidos os resultados, em cada trecho da rede de drenagem, após simulação no modelo hidrológico-hidráulico SWMM.

A calibração e validação dos parâmetros do modelo SWMM envolvem a identificação de valores observados que se aproximem dos valores estimados pelo modelo (NUNES et al., 2017). Neste trabalho, o ajuste foi realizado conforme a identificação de parâmetros definidos nas instruções técnicas para elaboração de estudos hidrológicos, no âmbito dos sistemas de microdrenagem, definidas em Rio-Águas (2019), tendo em vista as dificuldades de obtenção de dados de monitoramento de sistemas de microdrenagem em áreas urbanas.

6.1.1 Rede N1-Deságue Out1

Nas figuras 36 e 37, são apresentados os trechos de rede T1 a T7, constituídos pelos poços de visita N1 a N7 e correspondente deságue Out1, bem como o perfil correspondente, conforme simulação do cenário atual no modelo SWMM. Considerou-se o tempo de concentração inicial, no poço de visita N1, igual a 10 minutos e adotou-se o método cinemático para o cálculo do tempo de percurso na rede, conforme Rio-Águas (2019), obtendo-se o tempo médio de concentração de aproximadamente 13 minutos, no deságue Out 1. Segundo Rio-Águas (2019), para a área eleita, utilizou-se a equação IDF do posto Bangu, para um tempo de recorrência de 10 anos, recomendado em projetos de microdrenagem urbana.

Quadro 7– Relatório referente a rede N1-Deságue Out1

	Altura de precipitação (mm)
Precipitação total	34.376
Infiltração	7.806
Escoamento Superficial	18.594
Armazenamento Final	7.991
Erro de Continuidade	-0.015 (equivalente a -0.04%)

Fonte: Autor (2023)

Quadro 8 – Relatório referente às vazões máximas e volumes afluentes em PV's da rede N1-Deságue Out1

Nó	Vazão máxima de entrada (L/s)	Volume máximo de entrada (10^6 L)
N1	35.42	0.0207
N2	83.79	0.0482
N3	146.03	0.082
N4	202.35	0.112
N5	284.54	0.148
N6	277.00	0.151
N7	242.05	0.131
Out	208.51	0.113

Fonte: Autor (2023)

Quadro 9 – Relatório referente extravasamento em PV's da rede N1-Deságue Out1

Nó	Horas de inundação	Vazão Máxima	Volume de inundação (10^6 L)
N4	0,05	7.65	0.001
N5	0,15	88.46	0.032
N6	0,15	80.02	0.035
N7	0,15	49.22	0.017

Fonte: Autor (2023)

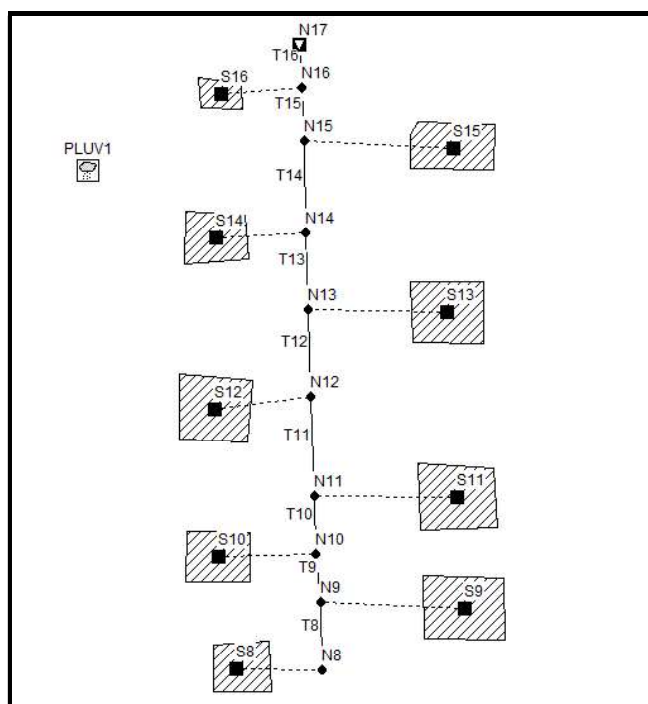
No que se refere à avaliação da resiliência de forma quantitativa, verificou-se que os poços de visita N5 e N6 foram considerados os mais críticos, tendo em vista os valores referentes aos volumes de afluência e de extravasamento nos poços de visita, conforme os quadros 08 e 09. O índice de resiliência operacional, *Reso*, pode ser estimado através da equação (12). Considerou-se o tempo de concentração inicial no poço de visita N1 igual a

10 minutos, e adotou-se o método cinemático para o cálculo do tempo de percurso na rede, conforme Rio-Águas (2019), obtendo-se o valor do índice de resiliência operacional, *Reso*, de 0,85 no ponto N5 e de 0,84 no ponto N6.

6.1.2 Rede N8-N17

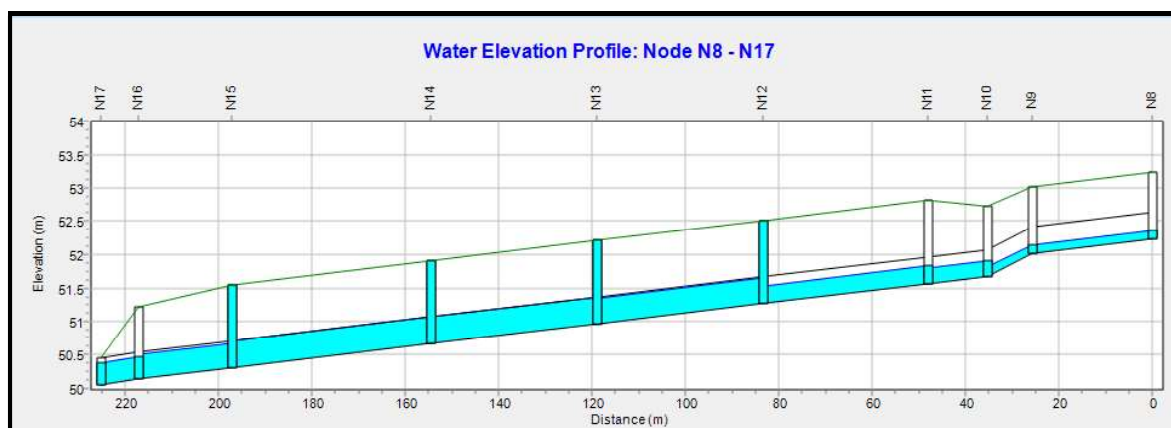
Nas figuras 38 e 39, são apresentados os trechos de rede T8 a T16, constituídos pelos poços de visita N8 a N17, bem como o perfil correspondente, conforme simulação do cenário atual no modelo SWMM. Considerou-se o tempo de concentração inicial, no poço de visita N8, igual a 10 minutos e adotou-se o método cinemático para o cálculo do tempo de percurso na rede, conforme Rio-Águas (2019), obtendo-se o tempo médio de concentração de aproximadamente 13 minutos, no deságue N17. Segundo Rio-Águas (2019), para a área eleita, utilizou-se a equação IDF do posto Bangu, para um tempo de recorrência de 10 anos, recomendado em projetos de microdrenagem urbana.

Figura 38 – Rede N8-N17



Fonte: Autor (2023)

Figura 39 – Perfil da Rede N8-N17



Fonte: Autor (2023)

Nas considerações elencadas, verifica-se extravasamento pelos tampões dos poços de visita N12, N13, N14 e N15, conforme pode ser constatado no relatório do modelo SWMM, nos quadros 10 a 12. O escoamento, nos trechos entre os poços de visita mencionados continua ocorrendo em conduto forçado, não respeitando o percentual máximo de lâmina d'água de 85% do diâmetro, definido em RIO-ÁGUAS (2019). No quadro 10, o erro de continuidade considerado na simulação é de -0,04%.

Quadro 10 – Relatório referente a rede N8-N17

	Altura de precipitação (mm)
Precipitação total	34.376
Infiltração	7.806
Escoamento Superficial	18.590
Armazenamento Final	7.995
Erro de continuidade	-0.015 (equivalente a -0.04%)

Fonte: Autor (2023)

Quadro 11 – Relatório referente às vazões máximas e volumes afluentes em PV's da rede N8-N17

Nó	Vazão máxima de entrada (L/s)	Volume máximo de entrada (10^6 L)
N8	47.01	0.0285
N9	100.83	0.0592
N10	124.01	0.0725
N11	147.27	0.0857
N12	209.25	0.119
N13	267.53	0.151
N14	255.69	0.143
N15	260.89	0.149
N16	298.23	0.163
N17	303.02	0.162

Fonte: Autor (2023)

Quadro 12 – Relatório referente extravasamento em PV's da rede N8-N17

Nó	Horas de inundação	Vazão Máxima	Volume de inundação (10^6 L)
N12	0,1	17.79	0,003
N13	0,16	76.07	0,035
N14	0,16	64.21	0,028
N15	0,14	11.64	0,004

Fonte: Autor (2023)

No que se refere à avaliação da resiliência de forma quantitativa, verificou-se que o poço de visita N13 foi considerado o mais crítico, tendo em vista os valores referentes aos volumes de afluência e de extravasamento no poço de visita, conforme os quadros 11 e 12.

O índice de resiliência operacional, *Reso*, pode ser estimado através da equação (12). Adotou-se o tempo de concentração inicial no poço de visita N8 igual a 10 minutos, e adotou-se o método cinemático para o cálculo do tempo de percurso na rede, conforme Rio-Águas (2019), obtendo-se o valor do índice de resiliência operacional, *Reso*, de 0,85 no poço de visita N14.

6.2 Cenário proposto contemplando técnicas compensatórias

Considerando-se o cenário contemplando as técnicas compensatórias de pavimentação da via de acesso, estritamente local e de predominância de moradores e visitantes, em asfalto poroso, e das calçadas, em bloco de concreto vazado, bem como a previsão de aproximadamente 70% da área de cobertura das residências com telhado verde extensivo, foram obtidos os resultados, em cada trecho da rede de drenagem, após simulação no modelo hidrológico-hidráulico SWMM.

Os telhados foram analisados e selecionados através da sua forma geométrica, tipo de telhado, e localização das sub bacias no software QGIS, conforme figura 40.

Figura 40 – Telhados selecionados no software QGIS



Fonte: Autor (2023)

Além da marcação dos telhados verdes que foram utilizados na simulação, as figuras 41 e 42 apresentam a demarcação do pavimento permeável nas calçadas (bloco de concreto vazado) e nas vias (asfalto poroso).

Figura 41 – Demarcação do bloco de concreto vazado no software QGIS



Fonte: Autor (2023)

Figura 42 – Demarcação do asfalto poroso no software QGIS



Fonte: Autor (2023)

Além da análise de forma individual de cada técnica, também foi realizado de forma detalhada em software QGIS a determinação das áreas correspondentes ao conjunto dessas técnicas, conforme figura 43.

Figura 43 – Representação das técnicas compensatórias no QGIS

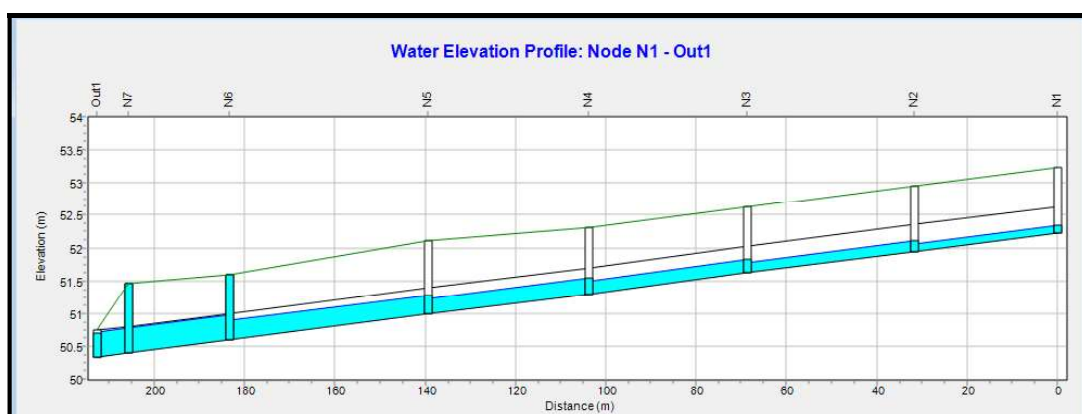


Fonte: Autor (2023)

6.2.1 Rede N1-Deságue Out1

Na figura 44, é apresentado o perfil correspondente os trechos de rede N1 – Deságue Out1, conforme simulação do cenário contemplando as técnicas SUDS elencadas.

Figura 44 – Perfil da Rede N1-Out1



Fonte: Autor (2023)

Houve redução de 9,96mm no escoamento superficial com a implementação das técnicas SUDS elencadas, de 18,59mm no cenário atual para 8,63mm, correspondendo a aproximadamente 53,6% de redução no valor do escoamento superficial da rede N1-

Deságue Out1, conforme relatório do modelo SWMM, no Quadro 13, para um erro de continuidade de -0,018%.

Quadro 13 – Relatório referente a rede N1-Out1

	Altura de precipitação (mm)
Precipitação total	34.376
Infiltração	13.237
Escoamento Superficial	8.634
Armazenamento Inicial LID	-0.572
Armazenamento Final	13.057
Drenagem LID	0.026
Erro de Continuidade	-0.006 (equivalente a -0.018%)

Fonte: Autor (2023)

Considerando-se as técnicas SUDS elencadas, verifica-se o extravasamento pelos tampões dos poços de visita N6 e N7 e não mais nos poços de visita N4 e N5, conforme pode ser constatado no relatório do modelo SWMM, quadro 14. No quadro 15, é apresentado o relatório referente aos volumes de entrada em poços de visita da rede.

Quadro 14 – Relatório referente extravasamento em PV's da rede N1-Deságue Out1

Nó	Horas de inundação	Vazão Máxima (L/s)	Volume de inundação (10 ⁶ L)
N6	0,03	18,06	0,001
N7	0,03	20,08	0,001

Fonte: Autor (2023)

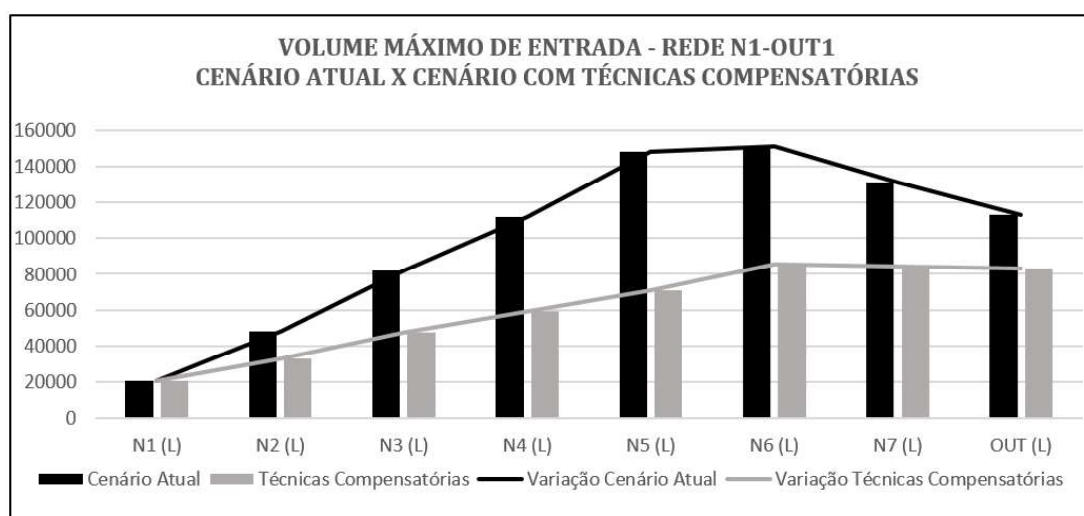
Quadro 15 – Relatório referente às vazões máximas e volumes afluentes em PV's da rede N1-Out1

Nó	Vazão máxima de entrada (L/s)	Volume máximo de entrada (10 ⁶ L)
N1	35.42	0.0207
N2	60.66	0.0327
N3	100.3	0.0477
N4	134.38	0.059
N5	171.76	0.0709
N6	215.03	0.0855
N7	212.91	0.0846
Out	207.71	0.0832

Fonte: Autor (2023)

No gráfico 1 é possível visualizar de forma comparativa os volumes máximos de entrada no cenário atual e utilizando técnicas compensatórias da rede N1-Out1.

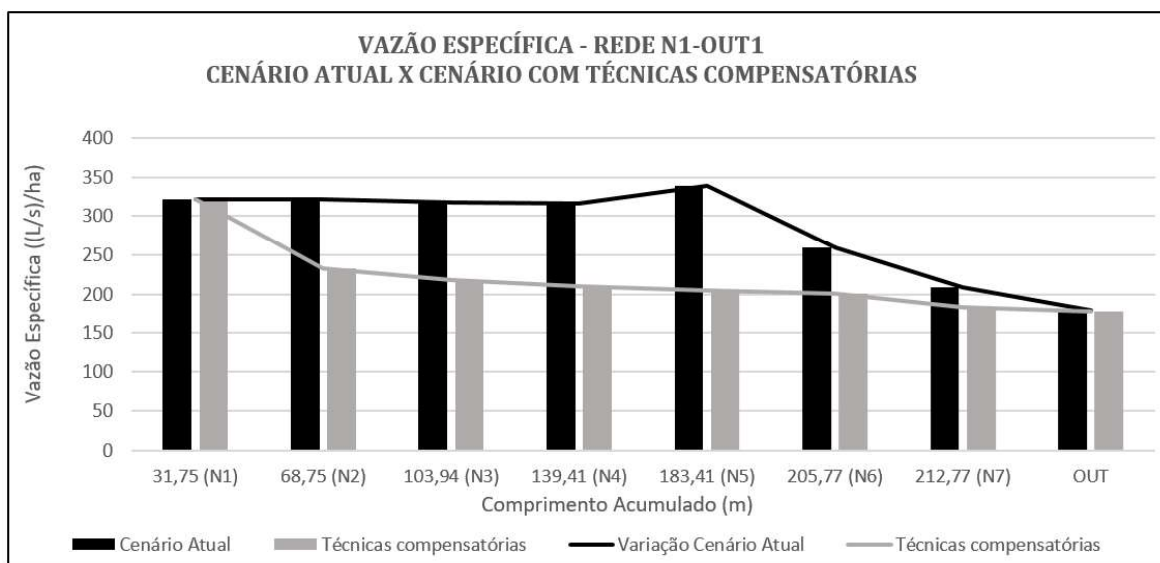
Gráfico 1 – Volume máximo de entrada nos cenários apresentados da rede N1-Out1



Fonte: Autor (2023)

No gráfico 2 é possível visualizar a vazão específica comparado com os comprimentos acumulados de cada nó nos cenários apresentados na rede N1-Out1.

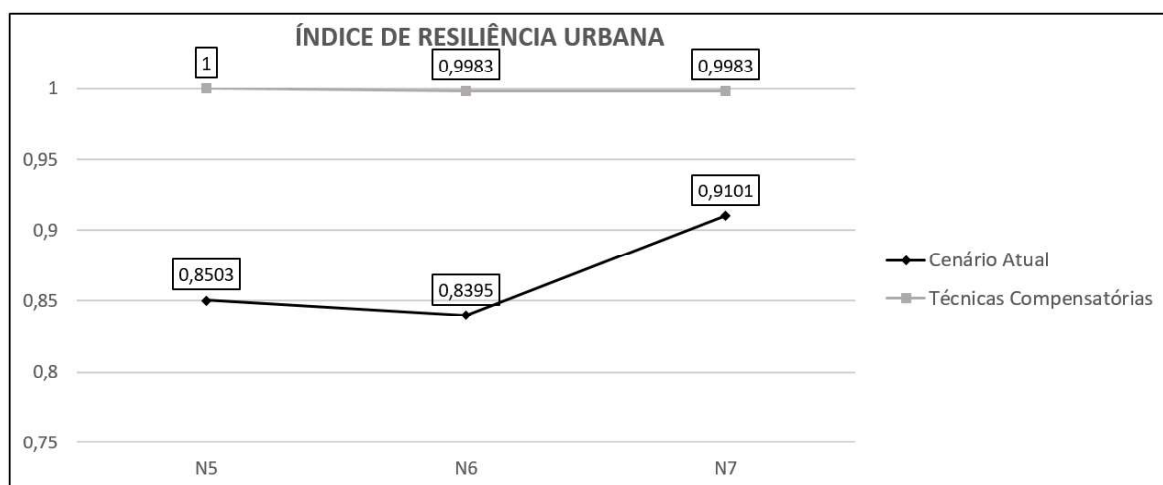
Gráfico 2 – Vazão Específica de acordo com o comprimento acumulado nos cenários apresentados da rede N1-Out1



Fonte: Autor (2023)

No que se refere ao índice de resiliência operacional, *Reso*, com a implementação das técnicas SUDS elencadas, foram obtidos os valores do índice de resiliência operacional, *Reso*, nos poços de visita N5, N6 e N7, iguais a 1,0, 0,99 e 0,99, respectivamente, superiores aos valores obtidos no cenário sem a utilização de técnicas SUDS, iguais a 0,85, 0,84 e 0,91, respectivamente. No gráfico 3 são apresentados os valores do índice de resiliência em cada ponto do estudo, comparando os cenários estudados.

Gráfico 3 – Índice de resiliência operacional nos cenários apresentados da rede N1-Out1

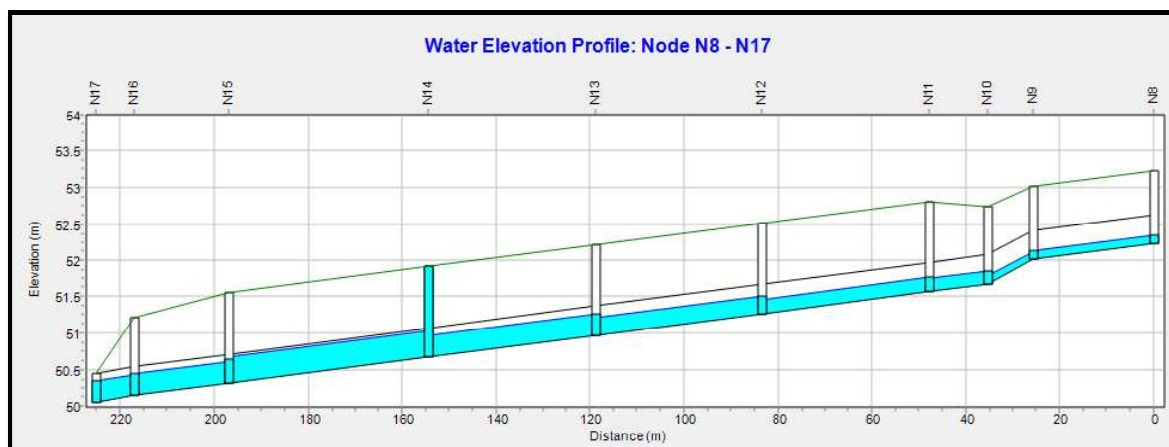


Fonte: Autor (2023)

6.2.2 Rede N8-N17

Na figura 46, é apresentado o perfil correspondente os trechos de rede N8–N17, conforme simulação do cenário contemplando as técnicas SUDS elencadas.

Figura 45 – Perfil da Rede N8-N17



Fonte: Autor (2023)

Houve redução de 9,84mm no escoamento superficial com a implementação das técnicas SUDS elencadas, de 18,59mm no cenário atual para 8,75mm, correspondendo a aproximadamente 52,9% de redução no valor do escoamento superficial da rede N8-N17, conforme relatório do modelo SWMM, no quadro 16.

Quadro 16 – Relatório referente a rede N8-N17

	Altura de precipitação (mm)
Precipitação total	34.376
Infiltração	12.608
Escoamento Superficial	8.753
Armazenamento Inicial - LID	-0.633
Armazenamento Final	13.620
Drenagem LID	0.035
Erro de Continuidade	-0.007 (equivalente a -0.019%)

Fonte: Autor (2023)

Considerando-se as técnicas SUDS elencadas, verifica-se o extravasamento pelo tampão do poço de visita N14 e não mais nos poços de visita N12, N13 e N15, conforme pode ser constatado no relatório do modelo SWMM, quadro 17.

Quadro 17 – Relatório referente extravasamento em PV's da rede N8-N17

Nó	Horas de inundação	Vazão Máxima (L/s)	Volume de inundação (10^6 L)
N14	0,03	16,02	0,001

Fonte: Autor (2023)

No quadro 18, é apresentado o relatório referente aos volumes de entrada em poços de visita da rede, bem como a vazão máxima em cada nó.

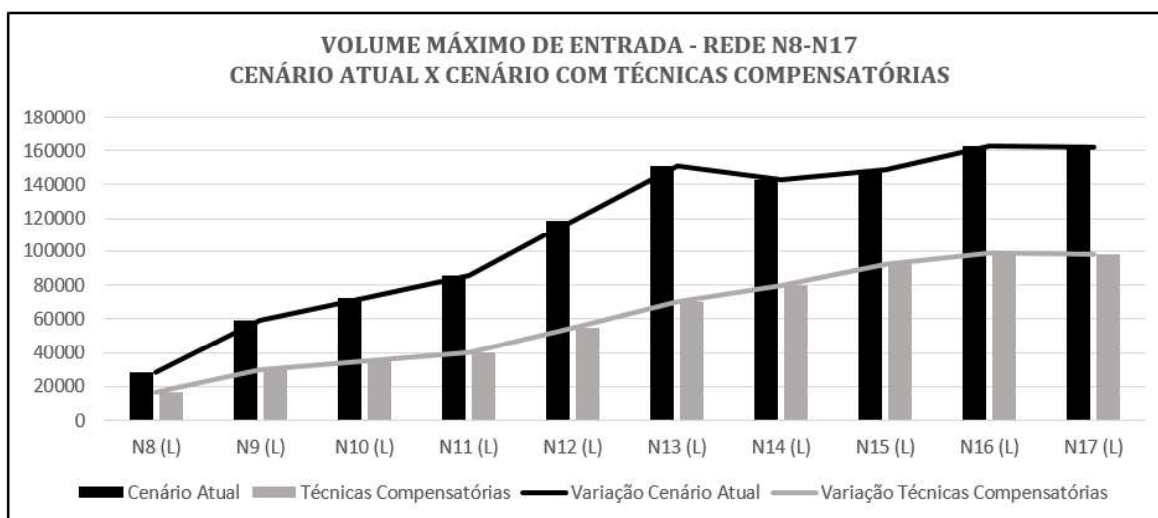
Quadro 18 – Relatório referente às vazões máximas e volumes afluentes em PV's da rede N8-N17

Nó	Vazão máxima de entrada (L/s)	Volume máximo de entrada (10^6 L)
N8	34.89	0.0163
N9	68.28	0.0295
N10	81.64	0.035
N11	95.22	0.0403
N12	135.16	0.055
N13	176.80	0.0702
N14	207.50	0,0796
N15	243.08	0.0924
N16	261.39	0.0987
N17	261.01	0.0978

Fonte: Autor (2023)

No gráfico 4 é possível visualizar de forma comparativa os volumes máximos de entrada no cenário atual e utilizando técnicas compensatórias da rede N8-N17.

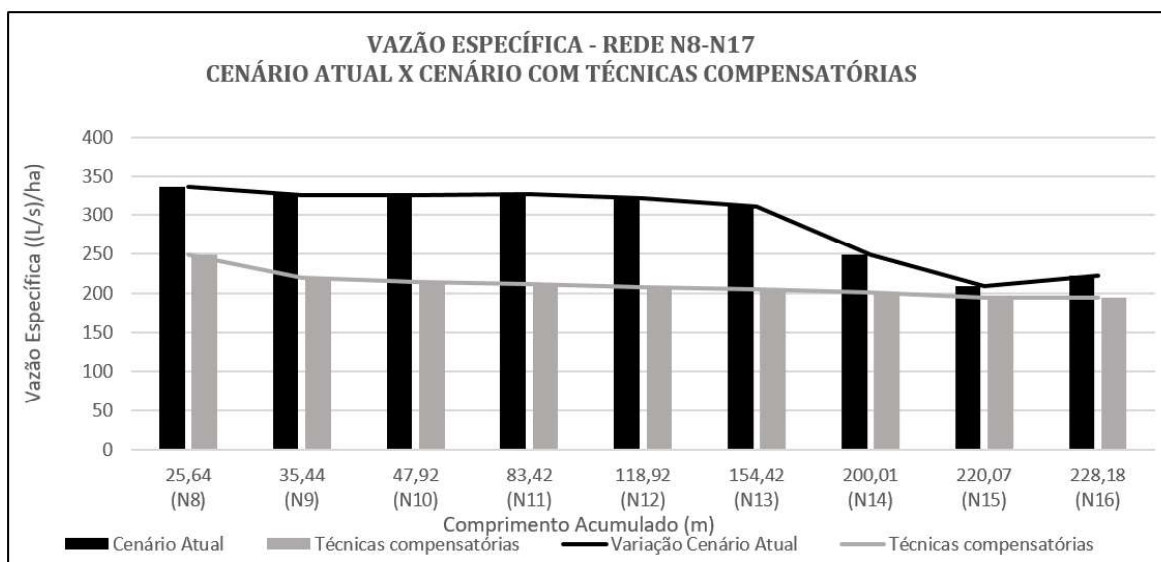
Gráfico 4 – Volume máximo de entrada nos cenários apresentados da rede N8-N17



Fonte: Autor (2023)

No gráfico 5 é possível visualizar a vazão específica comparado com os comprimentos acumulados de cada nó nos cenários apresentados na rede N8-N17.

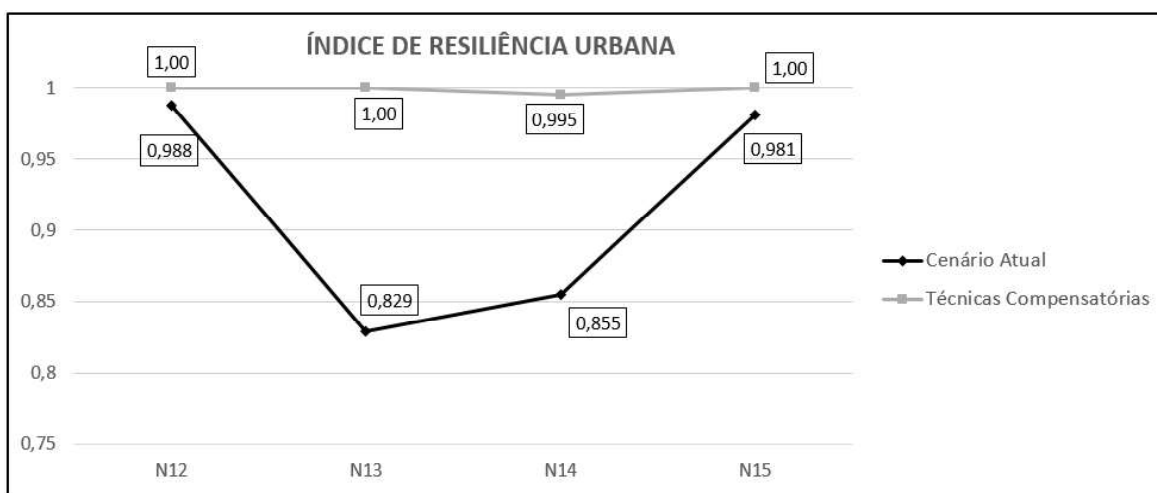
Gráfico 5 – Vazão Específica de acordo com o comprimento acumulado nos cenários apresentados da rede N8-N17



Fonte: Autor (2023)

No que se refere ao índice de resiliência operacional, *Reso*, com a implementação das técnicas SUDS elencadas, foram obtidos os valores do índice de resiliência operacional, *Reso*, nos poços de visita N12, N13, N14 e N15 de 1,00, 1,00, 0,99 e 1,00, superiores aos valores obtidos no cenário sem a utilização de técnicas SUDS, iguais a 0,98, 0,82, 0,85 e 0,98, respectivamente. No gráfico 6 são apresentados os valores do índice de resiliência em cada ponto do estudo, comparando os cenários estudados.

Gráfico 6 – Índice de resiliência operacional nos cenários apresentados da rede N8-N17



Fonte: Autor (2023)

6.3 Cenário com técnicas compensatórias com índice de resiliência operacional máximo em toda rede de drenagem

Considerando-se o cenário contemplando as técnicas compensatórias de pavimentação do leito carroçável do logradouro, em asfalto poroso, e das calçadas, em blocos de concreto vazado, bem como a previsão de implantação de cobertura das residências com telhado verde extensivo, de forma a alcançar o índice de resiliência operacional igual a 1 em todos os poços de visita da rede de drenagem do loteamento, foram obtidos os resultados, em cada trecho da rede de drenagem, após simulação no modelo hidrológico-hidráulico SWMM.

Os telhados verdes foram adicionados através da sua forma geométrica, tipo de telhado, e localização das sub bacias no software QGIS, conforme figura 46. Para este cenário, aproximadamente 90% dos telhados do condomínio foram considerados verdes, aumentando a eficiência de toda a rede de drenagem conforme os resultados que serão apresentados. Além dessa técnica, foi mantido o asfalto poroso nos logradouros e bloco de

concreto vazado nas calçadas. A figura 47 apresenta todas as técnicas compensatórias utilizadas nesta simulação.

Figura 46 - Telhados acrescidos visando a resiliência operacional máxima



Fonte: Autor (2023)

Figura 47 – Técnicas utilizadas visando a resiliência operacional máxima

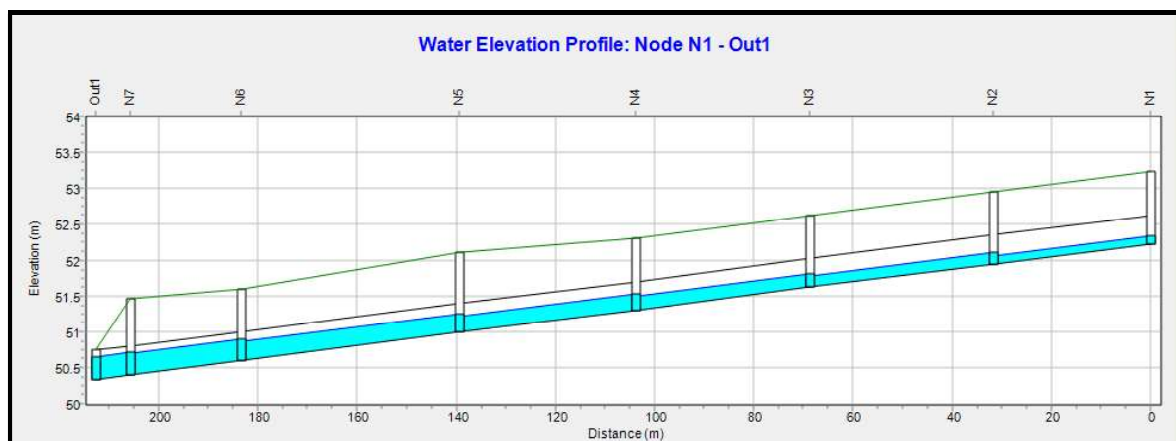


Fonte: Autor (2023)

6.3.1 Rede N1-Deságue Out1

Na figura 47, é apresentado o perfil correspondente os trechos de rede N1 – Deságue Out1, conforme simulação do cenário contemplando as técnicas SUDS elencadas.

Figura 48 – Perfil da Rede N1-Out1



Fonte: Autor (2023)

Houve redução de 12,05mm no escoamento superficial com a implementação das técnicas SUDS elencadas, de 18,59mm no cenário atual para 6,54mm no cenário proposto, considerando-se o índice de resiliência operacional igual a 1 em todos os poços de visita da rede de drenagem do loteamento, correspondendo a aproximadamente 64,8% de redução no valor do escoamento superficial da rede N1-Deságue Out1, conforme relatório do modelo SWMM, no Quadro 19.

Quadro 19 - Relatório referente a rede N1-Out1

	Altura de precipitação (mm)
Precipitação total	34.376
Infiltração	11.952
Escoamento Superficial	6.542
Armazenamento Inicial LID	0.989
Armazenamento Final	16.844
Drenagem LID	0.027
Erro de Continuidade	0.000

Fonte: Autor (2023)

Considerando-se as técnicas SUDS elencadas, verifica-se que não houve extravasamento em nenhum poço de visita da rede de microdrenagem, conforme premissa do cenário proposto. No quadro 20, é apresentado o relatório referente aos volumes de entrada em poços de visita da rede.

Quadro 20 - Relatório referente às vazões máximas e volumes afluentes em PV's da rede N1-Out1

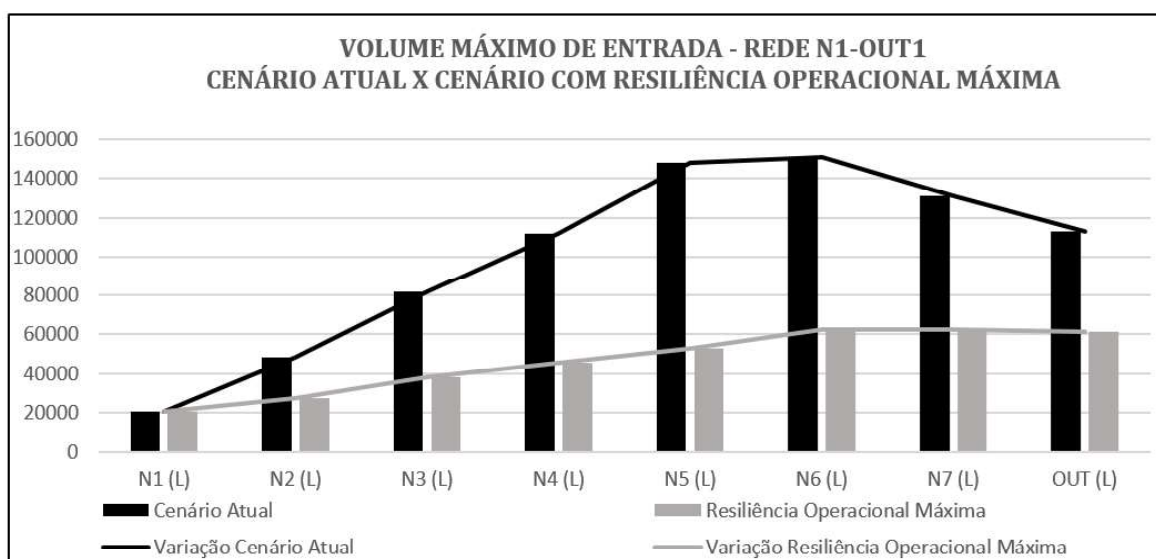
Nó	Vazão máxima de entrada (L/s)	Volume máximo de entrada (10⁶ L)
N1	34,56	0,0203
N2	57,98	0,0271
N3	91,54	0,0381
N4	119,27	0,0457
N5	146,94	0,0526
N6	179,42	0,0623
N7	182,05	0,0622
Out	180,82	0.0614

Fonte: Autor (2023)

No gráfico 7, é possível visualizar, de forma comparativa, os volumes máximos de entrada no cenário atual e utilizando técnicas compensatórias na rede N1-Out1, considerando-se o índice de resiliência operacional máximo, *Reso*, igual a 1 em todos os poços de visita da rede de drenagem do loteamento.

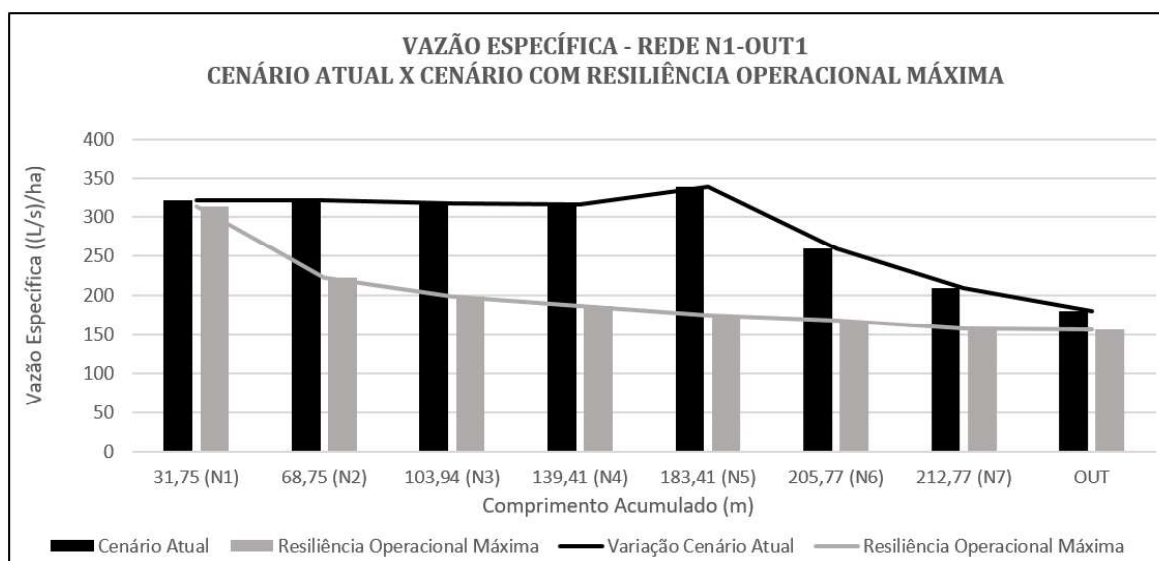
No gráfico 8 é possível visualizar a vazão específica comparado com os comprimentos acumulados de cada nó no cenário atual e com resiliência operacional máxima na rede N1-OUT1.

Gráfico 7 - Volume máximo de entrada nos cenários apresentados da rede N1-Out1



Fonte: Autor (2023)

Gráfico 8 – Vazão Específica de acordo com o comprimento acumulado no cenário com resiliência operacional máxima na rede N1-OUT1

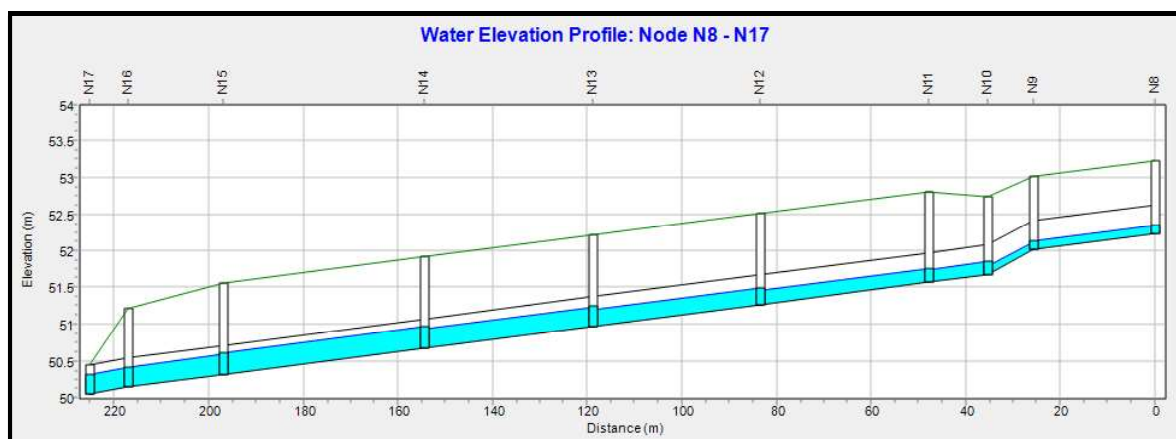


Fonte: Autor (2023)

6.3.2 Rede N8-N17

Na figura 48, é apresentado o perfil correspondente os trechos de rede N8–N17, conforme simulação do cenário contemplando as técnicas SUDS elencadas.

Figura 49 – Perfil da Rede N8-N17



Fonte: Autor (2023)

Houve redução de 11,06mm no escoamento superficial com a implementação das técnicas SUDS elencadas, de 18,59mm no cenário atual para 7,53mm no cenário proposto, considerando-se o índice de resiliência operacional igual a 1 em todos os poços de visita da rede de drenagem do loteamento, correspondendo a aproximadamente 59,5% de redução no valor do escoamento superficial da rede N8-N17, conforme relatório do modelo SWMM, no quadro 21.

Quadro 21 - Relatório referente a rede N8-N17

	Altura de precipitação (mm)
Precipitação total	34.376
Infiltração	11.813
Escoamento Superficial	7.533
Armazenamento Inicial LID	0.868
Armazenamento Final	15.866
Drenagem LID	0.036
Erro de Continuidade	-0.009 (equivalente a -0.004%)

Fonte: Autor (2023)

Considerando-se as técnicas SUDS elencadas, verifica-se que não houve extravasamento em nenhum poço de visita da rede de microdrenagem, conforme premissa do cenário proposto. No quadro 22, é apresentado o relatório referente aos volumes de entrada em poços de visita da rede, bem como a vazão máxima em cada nó.

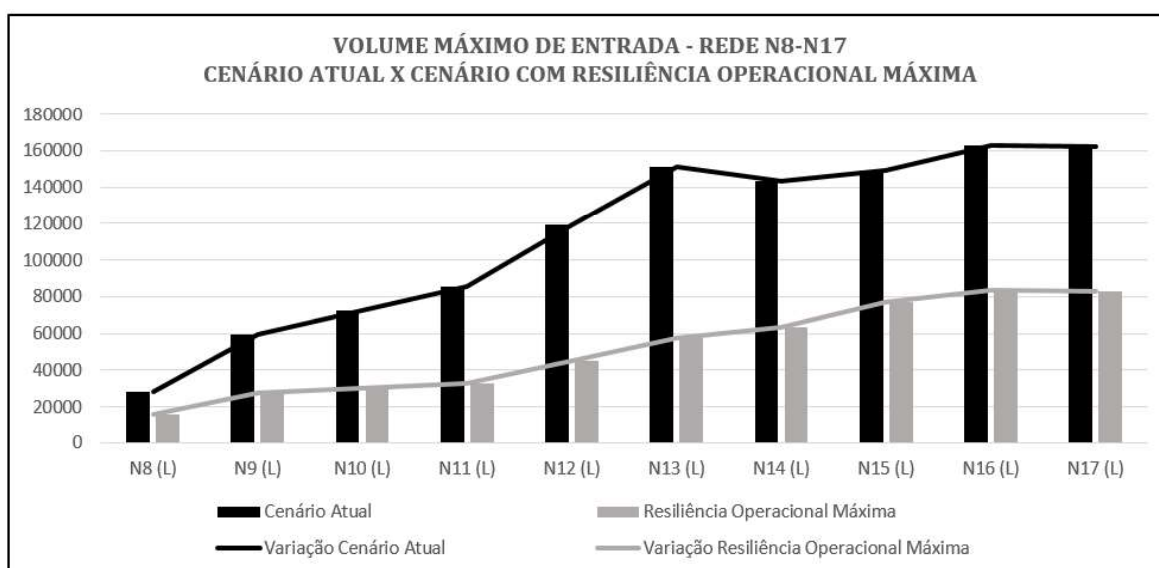
Quadro 22 - Relatório referente às vazões máximas e volumes afluentes em PV's da rede N8-N17

Nó	Vazão máxima de entrada (L/s)	Volume máximo de entrada (10 ⁶ L)
N8	34.86	0.0163
N9	67.54	0.0295
N10	79.4	0.035
N11	92.4	0.0403
N12	128.43	0.055
N13	165.68	0.0702
N14	190.69	0.0796
N15	228.12	0.0924
N16	245.19	0.0987
N17	244.37	0.0978

Fonte: Autor (2023)

No gráfico 9, é possível visualizar, de forma comparativa, os volumes máximos de entrada no cenário atual e utilizando técnicas compensatórias na rede N8-N17, considerando-se o índice de resiliência operacional máximo, *Reso*, igual a 1 em todos os poços de visita da rede de drenagem do loteamento.

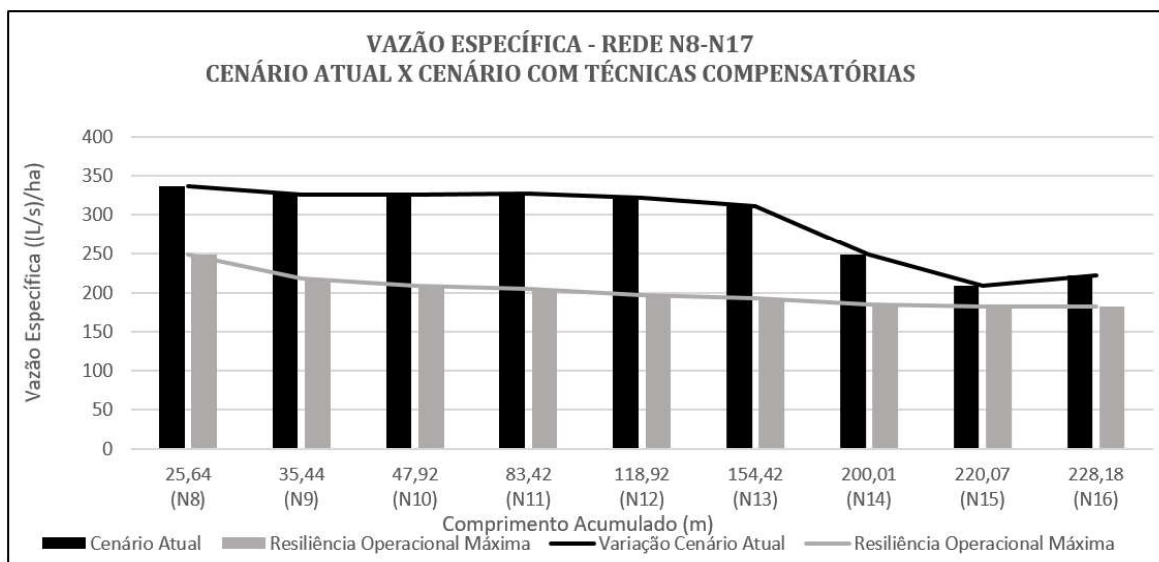
Gráfico 9 - Volume máximo de entrada nos cenários apresentados da rede N8-N17



Fonte: Autor (2023)

No gráfico 10 é possível visualizar a vazão específica comparado com os comprimentos acumulados de cada nó no cenário atual e com resiliência operacional máxima na rede N8-N17.

Gráfico 10 – Vazão Específica de acordo com o comprimento acumulado no cenário com resiliência operacional máxima na rede N1-OUT1



Fonte: Autor (2023)

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A resiliência de centros urbanos está associada à capacidade de resistir ou se recuperar dos impactos advindos de mudanças climáticas, sendo necessárias ações que garantam superar tais desafios. Numa visão moderna e sustentável, a rede de drenagem deve ser entendida como componente do espaço e da paisagem urbana e, para tal, deve-se contemplar o controle do escoamento superficial através de medidas que garantam o aumento da capacidade de armazenamento e permitam a infiltração das águas pluviais no solo, tanto no âmbito da microdrenagem como na macrodrenagem urbana.

No estudo específico em loteamento no bairro de Bangu, zona oeste da cidade do Rio de Janeiro, caracterizado por via de acesso local e de predominância de moradores e visitantes, foram contemplados cenários referentes à situação atual do sistema de drenagem urbana do loteamento, bem como previsão de utilização de pavimentos de asfalto poroso no leito carroçável das vias urbanas, blocos de concreto vazado nas calçadas e sistemas extensíveis de telhados verdes nas edificações em aproximadamente 70% da área total das coberturas, constatando-se uma redução do escoamento superficial do loteamento de 53,6% na rede N1-Deságue Out1 e de 52,9% na rede N8-N17, acarretando volumes inferiores de inundação em nós específicos da rede de drenagem, quando comparados aos cenários de situação atual do sistema de drenagem. Confrontando estes dois cenários, verificou-se um acréscimo no valor do índice de resiliência urbana, de 0,84 para 0,99 na rede N1-Deságue Out1 e de 0,85 para 0,99 na rede N8-N17.

Em um cenário contemplando a implantação de telhado verde extensivo, em aproximadamente 90% da área total das coberturas, visando obter o índice de resiliência operacional com valor 1,0 em todos os poços de visita da rede de microdrenagem do loteamento, verificou-se uma redução do escoamento superficial do loteamento de 64,8% na rede N1-Deságue Out1 e de 59,5% na rede N8-N17.

Os resultados obtidos nesta pesquisa demonstram que a adoção de técnicas sustentáveis em manejo de águas pluviais, privilegiando o aumento da capacidade de armazenamento e permitindo a infiltração das águas pluviais, é uma alternativa a ser avaliada pelos gestores municipais como solução a ser integrada ao desenho das cidades e ao tecido urbano, de forma a tornar as cidades mais resilientes no que se refere a eventos de chuvas intensas.

Como desafios de melhorias e recomendações para trabalhos futuros sobre a resiliência de centros urbanos visando desdobramentos e avanços na continuidade desta

pesquisa, deverão ser contempladas estimativas de custo referentes à utilização de técnicas compensatórias em manejo de águas pluviais, no âmbito da microdrenagem urbana, de forma a avaliar os custos sociais, tangíveis e intangíveis, além da viabilidade econômico-financeira de intervenções deste porte, com o intuito de dar subsídios ao planejamento de ações e tomada de decisões.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, M. S. P.; POLETO, C. (2012). Sistemas sustentáveis de drenagem urbana: dispositivos. *Holos Environment*, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 121-131, 21 out. 2012.

AQUAFLUXUS, Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos. Microdrenagem e Macrodrenagem – Os subsistemas característicos da drenagem urbana. Disponível em Microdrenagem e Macrodrenagem - os subsistemas característicos da drenagem urbana | AquaFluxus | Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos. Acesso em 05 Dez. 2022.

ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial. *RBRH- Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 5, n.3. Porto Alegre. 2000.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. Técnicas compensatórias em drenagem urbana. *ABRH - Porto Alegre*, 2005.

BARROS, E. N. S, BOAVENTURA, S. M. Estudo experimental do desempenho de pavimentos permeáveis como alternativa de redução do escoamento superficial em áreas urbanas. *REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, volume 15, nº 2, 2019.

BENINI, R. M., MEDIONDO, E. M. Urbanização e Impactos no Ciclo Hidrológico na Bacia do Mineirinho. *Floresta e Ambiente*. Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2015.

BERNUCCI, L. B. Pavimentação asfáltica. 2008. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2018/03/Cap-2-Ligantes-asf%C3%A1lticos.pdf>>. Acesso em 11 Fev. 2022.

BUENO, E.S., XIMENES, D. S. S. A importância da infraestrutura verde no desenho ambiental: estudo da área da Cidade Universitária e Instituto Butantã. *Revista LABVERDE*. São Paulo, 2011.

CANHOLI, A. P. Drenagem urbana e controle de enchentes. 2ª edição ampliada e atualizada. Editora Oficina de Textos. São Paulo. 2014.

CASTRO, A. S. Uso de pavimentos permeáveis e coberturas verdes no controle qualitativo do escoamento superficial urbano. *UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre, 2011.

COLLISCHONN W. Introduzindo hidrologia. *IPH - UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, 2010. Disponível em: <<http://www.ctec.ufal.br>>. Acesso em 11 Fev. 2022.

CORMIER, N. S.; PELLEGRINO, P. R. M. Infra-estrutura verde: uma estratégia paisagística para a água urbana. *Paisagem Ambiente: ensaios - n. 25 - São Paulo - p. 125 – 142*, 2008

DONG, X.; GUO, H.; ZENG, S. Enhancing future resilience in urban drainage system: Green versus grey infrastructure. *Water Research*, V. 124, pp. 280-289. 2019.

DNIT. Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem. MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. [S.l.]. 2005.

EBRAHIMIAN, A.; SOKOLOVSKAYA, N.; WADZUK, B. Modeling dynamic performance of urban infiltration trench systems: Methodology and a case study in Philadelphia. *Journal of Hydrology*, V. 594. 2021.

FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; PAIVA, R. C. D. de. Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Volume 19 n.4. Porto Alegre. 2014.

FERREIRA, E. C. Modelagem computacional com aplicação de técnicas de desenvolvimento de baixo impacto na bacia urbana do Riacho Moxotó na cidade de Recife/PE. UFPE – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017.

FONSECA, F. L. Manejo de águas pluviais com valorização de curso d'água: simulação computacional da bacia do rio tintas. PUC-Rio - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 23-32, 2018.

FEAM. Orientações Básicas para Drenagem Urbana. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte, 2006.

GENZ, F.; TUCCI, C. E. M. Controle do Escoamento em um Lote Urbano. *RBE - Caderno de Recursos Hídricos*, Porto Alegre - RS, junho 1995. P. 129-153.

GENZ, F.; TUCCI, C. E. M. Escoamento em Superfícies Urbanas. *RBE - Caderno de Recursos Hídricos*, Porto Alegre - RS, junho 1995. P.105-128.

GENZ, F.; TUCCI, C. E. M. Infiltração em Superfícies Urbanas. *Caderno de Recursos Hídricos*, Porto Alegre - RS, junho 1995. P. 77-103.

GONÇALVES, A. ; DE OLIVEIRA, R. H. Pavimentos permeáveis e sua influência sobre a drenagem. USP - Escola Politécnica da Universidade de São paulo. São Paulo, p. 12, 2014. (PHA2537).

GUEDES, C. S. Avaliação do desempenho hidrológico de pavimentos permeáveis. UFG - Universidade Federal de Goiás. Goiania, p. 22-73, 2015.

IBDA FÓRUM DA CONSTRUÇÃO. Asfalto Poroso absorve água e reduz risco de enchentes. Disponível em: <http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=17&Cod=704>. Acessado em 19 Março. 2022.

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Alterações Climáticas 2014 - Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade. Lisboa. 2014.

IPT. Mapeamento de Riscos em Encostas e Margens de Rios. Brasília. 2007.

OBADOWISKI B. L.; SANTOS, S. A. R.; SILVEIRA, A. Estudo da redução do escoamento superficial direto em superfícies permeáveis. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 18, n. 2, p. 11, Junho 2013. ISSN 2377-2377, 237-247.

KIA, A.; DELENS, J. M.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C. R. Structural and hydrological design of permeable concrete pavements. Case Studies in Construction Materials, V. 15. 2021.

KUMAR, S.; GUNTU, R. K.; AGARWA, A.; VILLURI, V. G. K.; PASUPULETI, S.; KAUSHAL, R.; GOSIAN, A. K.; BRONSTERT, A. Multi-objective optimization for stormwater management by green-roofs and infiltration trenches to reduce urban flooding in central Delhi. Journal of Hydrology, V. 606. 2022.

LEOPOLD, L.B. Hydrology for urban land planning - a guidebook on the hydrologic effects of urban land use. US.G.S. Circular. N. 554, p. 1-18, 1968.

LOURENÇO, R. Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentáveis. (2014). 164 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Politécnico de Coimbra.

MACEDO, F. V. C. B. de. Avaliação de Estratégias para Beneficiação de Drenagem Pluvial Urbana em Cenários de Alterações Climáticas Caso de Estudo da Bacia Bento Ferreira. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. 2017.

MACHADO, O. J; POLEZA, M. M. Medidas estruturais e não estruturais implementadas para minimizar impactos com as inundações no município de Taió. UNIDAVI - Centro Universitário do Alto Vale do Itajaí, 2017.

MASSA CINZENTA. Obras olímpicas: piscinões viram área de lazer. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/obras-olimpicas-piscinoes/>>. Acessado em 13 Maio. 2022.

MELO, T. A. T. Jardim de Chuva: sistema de biorretenção como técnica compensatória no manejo de águas pluviais urbanas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2011.

MENDES, A. T. Dispositivos de drenagem urbana de baixo impacto para diminuição da vazão no sistema de microdrenagem da bacia urbana do córrego Brejo Comprido, Palmas – TO. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Tocantins. Palmas. 2019.

METROPOLITAN COUNCIL. Minnesota Urban Small Sites BMP Manual: Stormwater Best Management Practices for Cold Climates. St. Paul, Minnesota, 2001.

MILOGRANA, J. Estudo de Medidas de Controle de Cheias em Ambientes Urbanos. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). –Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília. 2001.

MIGUEZ, M. G; VERÓL, A. P; REZENDE, O. M. Drenagem urbana: do projeto tradicional a sustentabilidade. 1º edição - Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

MUGUME, S. N.; GOMEZ, D. E.; FU, G.; FARMANI, R.; BUTLER, D. A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems. *Water Research*. n.81, p.15-26. 2015.

NUNES, D. M.; FONSECA, P. L.; SILVA, L. P. Avaliação do papel dos telhados verdes no desenho e desenvolvimento urbano de baixo impacto ambiental e no controle de enchentes na cidade do Rio de Janeiro. *Labor & Engenho*. V.11, n.3, p. 374-393, 2017.

OFICINA DE TEXTOS. Pavimentos permeáveis: utilização sistemática pelo mundo. Disponível em: <<https://www.ofitexto.com.br/comunitexto/pavimentos-permeaveis-utilizacao-sistemica-pelo-mundo/>>. Acesso em 12 Maio. 2022.

PAIVA, J. B. D. D; PAIVA, E. M. C. D. D. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, 2003.

PET ENG. CIVIL UEM. Disponível em: <https://petciviluem.com/2016/02/21/controle-deenchentes/>. Acessado em 11 Fev. 2022.

PINTO, L.L.C.A. O Desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. Projeto Piloto: Jardim de chuva em área pública no Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/10004661/4289423/JardimChuva.ruaAlmteGoncalves.pdf>>

REZENDE, O. M. Avaliação de medidas de controle de inundações em um plano de manejo sustentável de águas pluviais aplicado a baixada fluminense. COPPE/ UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 24-29, 2010.

RIO-ÁGUAS – Fundação Instituto das Águas do Município do Rio de Janeiro. Instruções técnicas para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana. 2ª. Versão. Rio de Janeiro. 2019.

ROSSMAN, L. A. Storm water management model user's manual. Version 5.0. Cincinnati, Oh: U.s. Environmental Protection Agency. 295 p. 2010.

SCHUELLER, T. Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs. 1987.

SANTOS, S. L. Pavimentos permeáveis no controle de cheias urbanas. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Aparecida de Goiânia, 2017.

SILVA, L. P. Hidrologia: Engenharia e Meio ambiente. 1º edição - Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SOUZA, V. C. B. de; MORAES, L. R. S.; BORJA, P. C. Déficit na drenagem urbana: buscando o entendimento e contribuindo para a definição. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA). v. 1, n. 2, p. 162-175. Salvador. 2013.

SUDERHSA. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Manual de Drenagem Urbana. Região Metropolitana de Curitiba – PR. Versão 1.0 , 2002.

SWMM - Storm Water Management Model. User's manual, version 5.2. United States Environmental Protection Agency. 2022.

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

TAVARES, T. G. A.; SILVA, D. F.; MONTE, B. E. O.; GOLDENFUM, J. A. Análise global da resiliência do sistema de drenagem de Tubarão/SC. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos- ABRHidro. Foz do Iguaçu. 2019

TOMAZ, P. Cálculos Hidrológicos e Hidráulicos para Obras Municipais. Editora Navegar. São Paulo. 2002.

TOMINAGA, E. N. S. Urbanização e cheias: medidas de controle na fonte. USP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 24-45, 2013.

TUCCI, C. E. M. Água no Meio Urbano. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997. Disponível em: <http://www.pec.poli.br/sistema/material_disciplina/fotos/%C3%A1guanomeio%20urbano.pdf>. Acesso em 28 Dez. 2021.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento de Drenagem Urbana. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 7 nº1. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. Disponível em: <<https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=99&SUMARIO=1583>>. Acesso em 28 Dez. 2021.

TUCCI, C. E. M. Gestão integrada das águas urbanas. Rega, Vol 5, 2008. Disponível em: <<https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=2&ID=72&SUMARIO=863>>. Acesso em 28 Dez. 2021.

TUNDISI, J. S. Água no século XXI: Enfrentando a escassez. 1º edição - Rio de Janeiro: RiMa, 2003.

URBONAS, B.; STAHR, P. Stormwater: best management practices and detention for water quality, drainage, and CSO management. Englewood Cliffs, New Jersey: PTR Prentice-Hall, 1993. 449p.

VIEIRA, I. L. S. Análise de Bacias de Retenção. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Centro de Competência de Ciências Exactas e da Engenharia. Universidade da Madeira. Funchal, Madeira, 2014.

VIRGILIIS, A. L. C. Procedimentos de Projeto e Execução de Pavimentos Permeáveis Visando Retenção e Amortecimento de Picos de Cheias. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2009.

YANG, J.; YU, Q.; GONG, P. Quantifying Air Pollution Removal by Green Roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, v. 42, n. 31, p. 7266-7273, oct. 2008.