



Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

Programa de Engenharia Urbana

JOÃO PAULO REBECHI FRAGA

**AVALIAÇÃO CUSTO-BENEFÍCIO CONSIDERANDO OS SERVIÇOS
ECOSSISTÊMICOS DE SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEIS
DISTRIBUIDOS NA ESCALA DE BACIA. ESTUDO DE CASO DA BACIA DO
CANAL DO MANGUE, RIO DE JANEIRO, RJ**

Rio de Janeiro

2024



UFRJ

JOÃO PAULO REBECHI FRAGA

**AVALIAÇÃO CUSTO-BENEFÍCIO CONSIDERANDO OS SERVIÇOS
ECOSSISTÊMICOS DE SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEIS
DISTRIBUIDOS NA ESCALA DE BACIA. ESTUDO DE CASO DA BACIA DO
CANAL DO MANGUE, RIO DE JANEIRO, RJ**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientador: Marcelo Gomes Miguez

Coorientadora: Aline Pires Veról

RIO DE JANEIRO

2024

Fraga, João Paulo Rebechi.

Avaliação Custo-Benefício Considerando os Serviços Ecossistêmicos de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis Distribuídos na Escala de Bacia. Estudo de Caso da Bacia do Canal do Manguê, Rio de Janeiro, RJ/ João Paulo Rebechi Fraga. – 2024. 218 f.: 67 il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Engenharia Urbana, Rio de Janeiro, 2024.

Orientador: Marcelo Gomes Miguez; Aline Pires Veról

1. Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis. 2. Análise Custo-Benefício. 3. Serviços Ecossistêmicos. 4. Modelagem Hidrológica. 5. Modelagem Hidrodinâmica. I. Miguez, Marcelo Gomes. *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. III. Mestre em Engenharia Urbana.



UFRJ

AVALIAÇÃO CUSTO-BENEFÍCIO CONSIDERANDO OS SERVIÇOS
ECOSSISTÊMICOS DE SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEIS
DISTRIBUIDOS NA ESCALA DE BACIA. ESTUDO DE CASO DA BACIA DO CANAL
DO MANGUE, RIO DE JANEIRO, RJ

JOÃO PAULO REBECHI FRAGA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Urbana, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Aprovada pela Banca:

Presidente, Prof^o. Marcelo Gomes Miguez, D.Sc., PEU/POLI/UFRJ

Prof^a. Bruno Luis de Carvalho da Costa, D.Sc., FAU/UFRJ

Prof^a. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral, D.Sc., UFPE

RIO DE JANEIRO

2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu pai (*in memoriam*) por sempre ter me ensinado a importância da educação e dos estudos. Espero fazer jus a sua vida repleta de bondade e perseverança. Sua passagem iluminou o caminho de muita gente, principalmente o meu. Sou muito grato por ser sido seu filho e espero iluminar o caminho de outras pessoas também.

À minha mãe que sempre se preocupou comigo e me apoiou desde sempre.

Aos meus orientadores Marcelo Gomes Miguez e Aline Veról, muito obrigado pela paciência e palavras de motivação quando pensei em desistir. Espero fazer jus à dedicação de vocês em transmitir seus conhecimentos e carinho. Meus profundos agradecimentos.

Aos meus companheiros que o Laboratório de Águas e Cidades me proporcionou, Bruna Battemarco, Luciana Guimarães, Antônio Krishnamurti, Osvaldo Resende, Matheus Martins, Fernanda Tomaz, Paulo Canedo de Magalhães, tenho muita sorte por meu caminho ter cruzado com os seus, muito obrigado pelos ensinamentos, companheirismo e amizade.

Aos meus amigos de mestrado Bruna, Diogo e, em especial, a Carolina Lopes por ter me ouvido resmungar durante os últimos dias e pelo incentivo!

À Celi Okumura que confiou no meu trabalho e aceitou meu auxílio, que acabou me beneficiando na consolidação do conhecimento e ao Roberto Arruda, que me motivou a continuar e me ajudou na disciplina a qual originou esse tema.

Aos meus companheiros de trabalho, Wanderson José dos Santos, Marlon Alvarez, Rodrigo Nascimento, Patrícia Montezuma, Emanuele Maio, Marina Leixas, Georgiane Costa, Daniel Rienda, Simone Pessanha, Claudio d'Almeida, Morvan Nobre, Tatiana Gregório, André Guerreiro, Ana Cristina Lopes, e em especial meu gerente Gilberto Filho, que sempre me apoiou quando precisava, meu escudo! Muito obrigado!

*“The cynic knows the price of everything
and the value of nothing.”*

Oscar Wilde

RESUMO

FRAGA, João Paulo Rebechi. **Avaliação Custo-benefício Considerando os Serviços Ecosistêmicos de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis Distribuídos na Escala de Bacia. Estudo de Caso da Bacia do Canal do Mangue, Rio de Janeiro, RJ.** Rio de Janeiro, 2014. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Urbana, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Com a crescente demanda por espaços urbanos, cada vez mais escassos, somados aos efeitos das mudanças climáticas, há uma tendência de aumento da população presente em áreas de alto risco de cheias. Neste contexto, uma mudança de paradigma no modo como ocorre o desenvolvimento é primordial para construir cidades mais seguras contra desastres hidrológicos. Os sistemas de drenagem urbana sustentáveis têm sido propostos para compatibilizar as demandas urbanas e naturais, preservando ou recuperando as funções ambientais. Contudo, apesar da comprovação de seus desempenhos pela academia, tais soluções apresentam diversos desafios e barreiras na sua implementação pelos gestores urbanos. Este trabalho visa evidenciar os potenciais benefícios monetários dos serviços ecosistêmicos de sistemas de drenagem sustentáveis, muitas vezes negligenciados no processo de tomada de decisão, por meio de sua inclusão em análises de custo-benefício para a implantação dessas medidas distribuídas na escala de bacia. Em alguns cenários, os benefícios dos serviços ecosistêmicos foram superiores aos da redução do prejuízo anual esperado e determinantes para a viabilidade econômica.

Palavras-chave: Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis, Análise Custo-Benefício, Serviços Ecosistêmicos, Modelagem Hidrológica, Modelagem Hidrodinâmica

ABSTRACT

FRAGA, João Paulo Rebechi. **Avaliação Custo-benefício Considerando os Serviços Ecossistêmicos de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis Distribuídos na Escala de Bacia. Estudo de Caso da Bacia do Canal do Manguê, Rio de Janeiro, RJ** Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Urbana, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

With the increasing demand for urban spaces, which are becoming increasingly scarce, coupled with the effects of climate change, there is a tendency for the population in high-risk flood areas to increase. In this context, a paradigm shift in our development approach is crucial to building safer cities against hydrological disasters. Sustainable urban drainage systems balance urban and natural demands, preserving or restoring environmental functions. However, despite their proven performance by academia, these solutions face various challenges and barriers in their implementation by urban managers. This work aims to highlight the potential monetary benefits of ecosystem services provided by sustainable drainage systems, often neglected in the decision-making process, by including them in cost-benefit analyses for the implementation of these measures at the watershed scale. In some scenarios, the benefits of ecosystem services were superior to the reduction of expected annual damages and crucial for economic viability.

Keywords: Sustainable Urban Drainage Systems, Cost-Benefit Analysis, Ecosystem Services, Hydrological Modeling, Hydrodynamic Modeling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Resumo gráfico do artigo antecedente.	6
Figura 1.2 - Desenhos esquemáticos das tipologias de implantação no lote (TIL), mapeamento na Sub-bacia e quantificação.	8
Figura 2.1 - Processo de impactos da urbanização.	12
Figura 2.2 - Classificação de prejuízos de cheias urbanas.	15
Figura 3.1 - Fluxograma resumido da metodologia.	35
Figura 3.2 - Exemplo de vista 3D dos shapefiles de edificações na região do Shopping Tijuca, em tons de cinzas, e o resultado do processo, em vermelho.	44
Figura 3.3 - Exemplo do resultado do processo de classificação de imagem e definição de tipo de cobertura para edificações. Os telhados cerâmicos estão em cores laranjas, lajes em cores pretas e outros em cores bege e branco.	45
Figura 3.4 - Exemplo de chuva de projeto com distribuição conforme blocos alternados com seu pico no 50% de sua duração.	49
Figura 3.5 - Rotina de cálculo de chuva efetiva de um reservatório.	53
Figura 3.6 – Corte esquemático do pavimento permeável e jardim de chuva nos espaços livres dos lotes.	56
Figura 3.7 - Esquema de reservatórios em cascata considerados no cenário de SDUS.	57
Figura 3.8 - Método de obtenção do prejuízo anual esperado.	63
Figura 3.9 - Representação da relação de contiguidade entre polígonos. a) Mapa com as linhas de contiguidade. As linhas em vermelho são geradas pelo compartilhamento de vértice. b) Os esquemas de fronteiras, nomeada conforme movimentação de peças de xadrez.	69
Figura 3.10 - Principais formulações de modelos de econometria espacial.	71
Figura 4.1 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Canal do Mangue.	80
Figura 4.2 – Mapa hipsométrico e hidrografia da bacia do Canal do Mangue.	83
Figura 4.3 – Mapa de declividade da bacia do Canal do Mangue.	83
Figura 4.4 – a) Mapa de uso e ocupação de solo da BCM. b) Gráfico de porcentagem por uso e ocupação do solo da BCM.	84
Figura 4.5 – Mapa de plano urbano proposto por Beaurepaire Rohan para a cidade do Rio de Janeiro (1840-1843). Traçados em cinza claro indicam arruamentos atuais.	86

Figura 4.6 – a) Imagem da construção da Av. Maracanã com vista para montante do rio próximo à atual Praça Varnhagen (1922). b) Imagem atual do mesmo local (2024).	87
Figura 4.7 – Linha do tempo de intervenções de drenagem e de urbanização para a Bacia do Canal do Mangue até 2013.	88
Figura 4.8 - Linha do tempo com eventos de cheias e intervenções de mitigação de cheias na Bacia do Canal do Mangue.....	89
Figura 4.9 – a) Imagem de alagamento na Praça da Bandeira no ano de 29/01/1940. b) Imagem de alagamento na Praça da Bandeira em 12/03/2016.	90
Figura 4.10 – Mapeamento de áreas com registo das cheias de abril de 2010 na BCM.	91
Figura 4.11 – a) Mapa com diagramas em barras empilhadas com as ocorrências do COR relacionadas às chuvas. b) Gráfico com quantidades de ocorrências do COR por bairro ao longo do tempo. Período dos dados: 2015 – 2023.....	92
Figura 4.12 – Mapa de intervenções previstas na bacia do Canal do Mangue pelo PDMAP.....	96
Figura 4.13 – a) Gradeamento da estrutura de entrada do reservatório da Praça Varnhagen obstruído. b) Serviço de corte de barras do gradeamento para ampliação do espaçamento.....	98
Figura 4.14 - Principais alternativas de controle de cheias a serem implantadas e implantadas na BCM.	99
Figura 4.15 – Mapa de densidade demográfica para a BCM.	100
Figura 4.16 – As três dimensões do IPS adaptado pelo IPP.....	101
Figura 4.17 – a) Mapa de resultados do IPS por setores censitários do censo de 2010 para a Bacia do Canal do Mangue. b) Gráfico de barras empilhadas dos 5 melhores e 5 piores bairros com resultados de IPS de 2022 para a BCM. Os resultados em parênteses são referentes ao IDS e o ranking relativo a todos os bairros da cidade, respectivamente.	102
Figura 4.18 – Mapa de renda média por setor censitário para a BCM (Censo 2010).	103
Figura 4.19 – Evolução das tipologias arquitetônicas na sub-bacia do Rio Trapicheiros.	103
Figura 4.20 – Mapa dos grupos de edificações na sub-bacia do Rio Trapicheiros.	105

Figura 4.21 - Telhados com inclinação inferior a 5° na região central da BCM.	107
Figura 4.22 – Fluxograma aplicada para avaliação do potencial de aproveitamento de água de chuva.....	108
Figura 4.23 - Mapa de potencial de aproveitamento de água de chuva para a região central da BCM.....	108
Figura 5.1 - Edificações por tipo de cobertura. Região da Praça Edmundo Rego, no bairro do Grajaú.	109
Figura 5.2 - Edificações por tipo de cobertura. Região da Praça Afonso Pena, no bairro da Tijuca.....	110
Figura 5.3 - Edificações por tipo de cobertura. Região da Marquês de Sapucaí, no bairro da Cidade Nova.	110
Figura 5.4 – a) Gráfico de caixa para as áreas de edificações e tipo de cobertura para a Bacia do Canal do Mangue. b) Gráfico de pizza do total da área por tipo de cobertura.	111
Figura 5.5 - Mapa de edificações por tipo de uso residencial e não residencial da bacia do Canal do Mangue.	112
Figura 5.6 - Gráfico de caixa dos resultados de coeficiente de escoamento das células tratadas pelo modelo hidrológico.....	113
Figura 5.7 - Mapa de mancha de inundação da Situação Atual para o evento de tempo de recorrência de 10 anos.....	115
Figura 5.8 - Mapa de mancha de inundação do cenário de Telhado Verde para o evento de tempo de recorrência de 10 anos.	115
Figura 5.9 - Mapa de mancha de inundação do cenário de Reservatório de Lote para o evento de tempo de recorrência de 10 anos.	116
Figura 5.10 - Mapa de mancha de inundação do cenário de Infiltração para o evento de tempo de recorrência de 10 anos.....	116
Figura 5.11 - Mapa de mancha de inundação da Situação Atual para o evento de tempo de recorrência de 25 anos.....	117
Figura 5.12 - Mapa de mancha de inundação do cenário de Telhado Verde para o evento de tempo de recorrência de 25 anos.	117
Figura 5.13 - Mapa de mancha de inundação do cenário de Reservatório de Lote para o evento de tempo de recorrência de 25 anos.	118

Figura 5.14 - Mapa de mancha de inundação do cenário de Infiltração para o evento de tempo de recorrência de 25 anos.	118
Figura 5.15 - Mapa de mancha de inundação do cenário de SDUS para o evento de tempo de recorrência de 10 anos.	119
Figura 5.16 - Mapa de mancha de inundação do cenário de SDUS para o evento de tempo de recorrência de 25 anos.	119
Figura 5.17 - Gráfico caixa das reduções de altura máxima de cheia das células de escoamento dos cenários.	120
Figura 5.18 - Curva prejuízo versus profundidade de cheia para danos às edificações para cada padrão construtivo.	121
Figura 5.19 - Curva prejuízo versus profundidade de cheia para danos ao conteúdo para cada classe social.	121
Figura 5.20 - Curva prejuízo versus probabilidade para os cenários.	122
Figura 5.21 - Mapa de calor de valores unitário padrões de edificações residenciais para a Bacia do Canal do Mangue.	124
Figura 5.22 - Correlograma das variáveis.	128
Figura 5.23 – Gráfico Q-Q do modelo de regressão linear múltipla.	134
Figura 5.24 - Gráficos de dispersão de Moran. a) Para variável PGV. b) Para a variável HID_NA_05. c) Para os resíduos.	136
Figura 5.25 - Temperatura de conforto térmico em função da umidade do ar considerados como temperatura de balanço.	141
Figura 5.26 - Gráfico de exemplo com os valores de temperaturas e CDD desde 2020.	142
Figura 5.27 - Esquema do telhado verde considerado no trabalho.	144
Figura 5.28 – Modelo de reservatório considerando na metodologia. a) Imagem comercial dos tanques em área externa. b) Detalhe do dispositivo de descarte de <i>first flush</i> e cloração da água.	145
Figura 5.29 - Resultados de valores presentes líquidos para os cenários com e sem benefícios de serviços ecossistêmicos.	149
Figura 6.1 – Comparação gráfica dos valores calculados com as faixas da literatura.	156

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Fontes de dados utilizadas na metodologia.	42
Quadro 3.2 – Parâmetros considerados na caracterização das tipologias.....	43
Quadro 3.3 - Fórmulas de tempo de concentração.	48
Quadro 3.4 – Faixas usuais de coeficientes de escoamento superficial.	50
As parcelas de Manning podem ser obtidas conforme Quadro 3.5.....	51
Quadro 3.6 – Coeficientes de Manning por fatores de influência para canais naturais.	51
Outros valores típicos de coeficiente de Manning, como para canais artificiais, encontram-se no Quadro 3.7.....	52
Quadro 3.8 - Coeficientes de Manning para canais e cursos d’água naturais.	52
Quadro 3.9 – Valores de referências de capacidade de retenção de telhados verdes em função da inclinação do telhado.	55
Quadro 3.10 – Profundidade de inundação e descrição de prejuízos associados. ...	58
Quadro 3.11 - Características principais dos projetos-padrão de residência unifamiliar considerados por classe econômica.	59
Quadro 3.12 – Percentagem da edificação danificada em função da altura de inundação.....	60
Quadro 3.13 – Lista de conteúdo para residência padrão normal e a faixa de inundação associada ao prejuízo.	60
Por conta da ausência de fontes de dados para os atributos das habitações, este trabalho considerou as características do ambiente, como disponibilidade de serviços de saúde, educação, comércio, lazer e acessibilidade de meios de transportes. Todavia, se disponíveis, deve-se incluir variáveis de atributos das habitações, como quantidade de quarto, quantidade de banheiros, idade da propriedade e presença de comodidades (ex.: piscina, garagem, salão de festas). As variáveis estudadas nesse trabalho encontram-se no Quadro 3.14.....	64
Quadro 3.15 – Variáveis consideradas para avaliação do impacto das cheias nos preços dos imóveis.....	64
Quadro 3.16 – Tabela com raios de influência para cada tipo de atividade dos estabelecimentos de saúde, educação e lazer.....	65
Quadro 3.17 - Valores de duração e distância médias de caminhada por proposito de viagem.....	67

Quadro 3.18 - Preços unitários de coberturas verdes encontrados na literatura nacional. Os preços são referentes às datas das publicações.....	77
Quadro 3.19 - Composição do serviço de limpeza de pavimento permeável com jato d'água quente, varredura e sucção.	78
Quadro 4.1 - Intervenções de reservatórios previstos pelo Plano Diretor de Enchentes da Bacia do Canal do Mangue.	94
Quadro 5.1 - Raio de abrangência considerados para estabelecimentos de saúde.	125
Quadro 5.2 - Raio de abrangência considerados para estabelecimentos de educação.	126
Quadro 5.3 - Raio de abrangência considerados para estabelecimentos de comércio e lazer.	126
Quadro 5.4 – Parâmetros para definição das variáveis dummy de faixa de alagamentos.....	129
Quadro 5.5 - Valores de Fator de Inflação de Variância por variável.....	134
Quadro 5.6 – Padrão de consumo para aproveitamento de água de chuva.	143
Quadro 5.7 - Estrutura tarifária da Águas do Rio para categoria residencial (Tarifa 2) vigente a partir de novembro de 2023.....	144
Quadro 5.8 - Custo de mão de obra de instalação por metro quadrado de telhado verde. (IO: 04/2024).	145
Quadro 5.9 - Custo de instalação de reservatório de lote por metro cúbico (IO: 04/2024).	146
Quadro 5.10 - Custo de manutenção anual de pavimento permeável por metro quadrado (IO: 04/2024).	147
Quadro 5.11 – Método para cálculo do benefício anual de valorização imobiliária.	148
Quadro 6.1 - Pesquisa na literatura sobre impactos marginais de inundações nos preços dos imóveis.....	155
Quadro 8.1 - Custo de instalação de jardim de chuva por metro quadrado (IO: 04/2024).	199
Quadro 8.2 - Custo de instalação de pavimento permeável por metro quadrado (IO: 04/2024).	200

LISTA DE TABELAS

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2. MOTIVAÇÃO	3
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1. Objetivo Geral	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. TRABALHOS ANTECEDENTES	5
1.5. METODOLOGIA GERAL	8
1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. CHEIAS URBANAS E DANOS ASSOCIADOS.....	10
2.1.1. Causas das cheias urbanas	10
2.1.2. Consequências das Cheias Urbanas	13
2.2. SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEIS	16
2.2.1. Evolução do Conceito de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis	16
2.2.2. Técnicas e Práticas de Drenagem Urbana Sustentável	19
2.2.2.1. Telhados Verdes	20
2.2.2.2. Reservatórios de Lote	20
2.2.2.3. Jardins de Chuva	20
2.2.2.4. Pavimentos Permeáveis	21
2.3. SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS	21
2.3.1. Serviços Ecosistêmicos de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis	23
2.3.2. Valoração dos Serviços Ecosistêmicos	25
2.3.2.1. Função de Fator de Renda Líquida e Função de Produção	26
2.3.2.2. Custo de Substituição	27
2.3.2.3. Despesas Defensivas e Custos Evitados.....	27
2.3.2.4. Métodos dos Preços Hedônicos e Custo de Viagem	28
2.3.2.5. Método da Valoração Contingente e Método de Experimentos de Escolha	28
2.4. ANÁLISES DE VIABILIDADE ECONÔMICA	29
2.4.1. Análise de Custo-Benefício (ACB)	29

2.4.2.	Análise de Custo-Efetividade (ACE)	30
2.4.3.	Análise de Retorno sobre o Investimento (ROI)	30
2.4.4.	Análise Multicritério (AMC)	30
2.4.5.	Analises Custos-Benefícios de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis	31
3.	METODOLOGIA	33
3.1.	FERRAMENTAS.....	36
3.1.1.	Sistema de Informação Geográfica	36
3.1.2.	R Studio	37
3.1.3.	MODCEL – Modelo Hidrológico-Hidrodinâmico de Escoamento de Células 38	
3.1.4.	Fontes de dados	40
3.2.	CARACTERIZAÇÃO DAS TIPOLOGIAS DAS EDIFICAÇÕES	43
3.3.	MODELAGEM HIDROLÓGICA-HIDRODINÂMICA – MODCEL	45
3.3.1.	Parâmetros Hidrológicos e Hidráulicos	47
3.3.2.	Modelo hidrológico baseado em reservatórios	52
3.3.3.	Construção de cenários de modelagem	53
3.3.3.1.	Situação Atual (SA).....	54
3.3.3.2.	Telhados Verdes (TV).....	54
3.3.3.3.	Reservatório de Lote (RL).....	55
3.3.3.4.	Infiltração (IF).....	56
3.3.3.5.	Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis (SDUS)	56
3.4.	BENEFÍCIOS DO MANEJO DAS ÁGUAS PLUVIAIS	57
3.4.1.	Redução de Prejuízo Anual Esperado	58
3.4.2.	Valorização Imobiliária pela Redução das Cheias Urbanas	63
3.4.2.1.	Definição das variáveis	64
3.4.2.2.	Método dos Preços Hedônicos	67
3.4.2.3.	Métodos de Econometria Espacial.....	69
3.5.	BENEFÍCIOS DOS SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS	75
3.5.1.	Economia de Água Potável	75
3.5.2.	Economia de Energia Elétrica	75
3.6.	CUSTOS DE INSTALAÇÃO E MANUTENÇÃO.....	76
3.7.	ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO	78

3.7.1.	Valor Presente Líquido (VPL)	78
3.7.2.	Relação Custo-Benefício (RCB)	78
3.7.3.	Tempo de Retorno	79
3.7.4.	Taxa Interna de Retorno (TIR).....	79
4.	ESTUDO DE CASO - BACIA DO CANAL DO MANGUE – BCM.....	79
4.1.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	80
4.2.	BREVE HISTÓRICO DA BACIA DO CANAL DO MANGUE	84
4.3.	ÁREAS DE CHEIAS RECORRENTES	90
4.4.	PLANOS DE DRENAGEM URBANA	93
4.4.1.	Plano de Controle de Enchentes da Bacia do Canal do Mangue ..	93
4.4.2.	Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais - PDMAP	94
4.5.	CARACTERIZAÇÃO SOCIOECONÔMICA	99
4.6.	CARACTERIZAÇÃO URBANÍSTICA.....	103
4.7.	POTENCIAIS DE USO DE SISTEMA DE DRENAGEM SUSTENTÁVEIS	106
5.	RESULTADOS	109
5.1.	TIPOLOGIAS DAS EDIFICAÇÕES.....	109
5.2.	MODELO HIDROLÓGICO	113
5.3.	MODELAGEM HIDRODINÂMICA – MODCEL	114
5.4.	BENEFÍCIOS DO MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS.....	120
5.4.1.	Redução do Prejuízo Anual Esperado (PAE)	120
5.4.2.	Valorização Imobiliária	122
5.4.2.1.	Descrição dos dados.....	122
5.4.2.2.	Método dos Preços Hedônicos	128
5.4.2.3.	Modelos de Autorregressão Espacial.....	135
5.5.	BENEFÍCIOS DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS.....	140
5.5.1.	Economia de Energia de Refrigeração de Ambiente	140
5.5.2.	Economia por Aproveitamento de Água de Chuva	142
5.6.	CUSTOS DE INSTALAÇÃO E MANUTENÇÃO.....	144
5.6.1.	Telhados Verdes	144
5.6.2.	Reservatórios de Lote	145
5.6.3.	Jardim de Chuva.....	147
5.6.4.	Pavimento Permeável.....	147
5.7.	ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO.....	148

6. DISCUSSÃO	150
6.1. TIPOLOGIAS DAS EDIFICAÇÕES.....	150
6.2. MODELAGEM HIDROLÓGICA-HIDRODINÂMICA.....	152
6.3. BENEFÍCIOS DE MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS	153
6.4. BENEFÍCIOS DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS.....	157
6.5. ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO	158
6.6. LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	158
7. CONCLUSÃO.....	159
8. APÊNDICE	183
8.1. MAPAS DE INUNDAÇÃO	183
8.2. TABELAS ORÇAMENTÁRIAS.....	198

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

De acordo com o *Emergency Events Database*¹ (CRED, 2021), 4,31 bilhões de pessoas foram afetadas por desastres naturais no mundo, causando um prejuízo de 2,73 trilhões de dólares nos últimos vinte anos (2000-2020). Os desastres hidrológicos respondem por 40,7% do total de pessoas afetadas e 22,5% dos prejuízos monetários causados por desastres naturais. Entre as categorias de desastres naturais, as inundações são as que afetaram mais as pessoas, representando 40,6% do total de pessoas afetadas, e a segunda nos prejuízos causados, 0,61 trilhões de dólares. No Brasil, 34% do total de pessoas afetadas e 72% das mortes por desastres naturais foram causadas por desastres hidrológicos entre 1991 e 2012 (CEPED UFSC, 2012).

Em 2018, 55% da população mundial vivia em áreas urbanas e 68% estão projetados para 2050 (United Nations, 2019). Além disso, as áreas urbanas se expandem duas vezes mais rápido do que a média da taxa da população urbana (Seto; Parnell; Elmqvist, 2013).

O desenvolvimento urbano altera a cobertura do solo, expandindo a superfície impermeável e impactando no ciclo hidrológico e nos serviços ecossistêmicos (SE) (Stringfellow; Jain, 2010). A impermeabilidade das superfícies das bacias hidrográficas reduz a infiltração, aumentando os picos de vazões. A ocupação humana das planícies de inundação leva à exposição e à vulnerabilidade, aumentando o risco de inundação, estrangulando rios e limitando sua capacidade hidráulica (HUANG, 2019; MARDIN; SHEN, 2019). Além disso, a urbanização é responsável pela extração de recursos, diminuição da biodiversidade nativa, aumento de ilhas de calor e poluição do ar e da água

¹ Pelo menos um dos seguintes critérios deve ser cumprido para que um evento seja considerado como desastre no banco de dados EM-DAT: 10 ou mais mortes de pessoas, 100 ou mais pessoas afetadas / feridas / desabrigadas ou declaração do país de um estado de emergência e / ou um apelo para assistência internacional. O EM-DAT considera as pessoas afetadas por desastres onde precisam de "assistência imediata durante um período de emergência, ou seja, requerendo necessidades básicas de sobrevivência, como comida, água, abrigo, saneamento e assistência médica imediata." Isso, portanto, inclui pessoas deslocadas, mesmo que apenas por um dia, mas também pessoas que perderam suas casas ou sofreram ferimentos que mudaram sua vida.

causada pela redução da área natural que antes fornecia funções ecossistêmicas (Deng *et al.*, 2015).

Neste contexto, com a crescente demanda por espaços urbanos, há uma forte tendência de aumento da população exposta a desastres hidrológicos, gerando uma pressão sobre gestores urbanos e tomadores de decisão para mitigar os impactos desses desastres. As medidas estruturais convencionais, como canalizações e reservatórios, cada vez mais são de difícil implantação por conta da ausência de espaço livre e acabam perdendo eficiência ao longo da crescente urbanização desordenada e a intensificação das chuvas pelas mudanças climáticas (Miguez; Magalhães, 2010). Além disso, no caso das cidades brasileiras, o poder público apresenta um histórico de ineficiência no fortalecimento de políticas de uso do solo, controle de construções em áreas de risco, investimentos em sistemas de alerta precoce e promoção da educação comunitário sobre os riscos de inundações; medidas não-estruturais que são cruciais na redução de riscos.

Com isso, é urgente uma mudança de paradigma sobre como construímos as cidades e nos relacionamos com o ambiente natural. Uma alternativa para reverter esse cenário seria a adoção de soluções de drenagem urbana sustentáveis (SDUS) que visam promover o desenvolvimento preservando as condições do ciclo hidrológico natural, seguindo os princípios do desenvolvimento de baixo impacto (Fletcher *et al.*, 2015).

Apesar de ser um conceito já consolidado na literatura acadêmica e ter sua eficiência comprovada no manejo das águas pluviais (Joshi *et al.*, 2021), poucas ações de drenagem urbana sustentáveis são percebidas nas cidades brasileiras. A implementação de SDUS enfrenta diversos desafios e barreiras, especialmente em países em desenvolvimento.

Entre esses desafios estão a falta de recursos financeiros, o que dificulta a construção e manutenção de infraestruturas verdes (Shkaruba *et al.*, 2021). Além disso, a carência de conhecimento técnico especializado e a falta de integração entre políticas públicas e planejamento urbano são obstáculos significativos (Andrés-Doménech *et al.*, 2021). A resistência cultural à adoção de novas práticas e a priorização de soluções convencionais de engenharia também

limitam a adoção de SDUS (Jiusto; Kenney, 2016). E uma barreira de elevada relevância é a falta de percepção dos benefícios dos SDUS, tanto pelos gestores urbanos quanto da sociedade, que muitas vezes desconhecem os potenciais ganhos econômicos proporcionados por essas práticas sustentáveis.

Superar essas barreiras exige um esforço coordenado entre governos, academia e sociedade civil, além de investimentos em capacitação técnica e campanhas de conscientização sobre os benefícios dos SDUS para a mitigação das inundações e a melhoria da qualidade de vida urbana.

1.2. MOTIVAÇÃO

A avaliação custo-benefício considerando os serviços ecossistêmicos de SDUS na escala de bacia hidrográfica é crucial para a tomada de decisões informadas sobre infraestrutura urbana. Esses sistemas não apenas mitigam os impactos das inundações e melhoram a gestão das águas pluviais, mas também proporcionam uma série de benefícios ecossistêmicos, tanto para os entes públicos quanto para entes privados, como a melhoria da qualidade da água, a promoção da biodiversidade, a mitigação das ilhas de calor urbano e diversos outros. Ao quantificar esses benefícios em termos econômicos, a avaliação custo-benefício oferece uma visão abrangente dos custos e vantagens associados à implementação dos SDUS, justificando investimentos em soluções baseadas na natureza e sendo um fator motivador para a implantação dessas soluções.

Além disso, a integração dos serviços ecossistêmicos na avaliação custo-benefício de SDUS permite uma análise mais holística e sustentável das opções de gerenciamento de águas urbanas. Tradicionalmente, as análises de custo-benefício se concentram em aspectos financeiros diretos, negligenciando os impactos ambientais e sociais. Incorporar os serviços ecossistêmicos na avaliação promove uma abordagem que valoriza não apenas os retornos econômicos, mas também os benefícios a longo prazo para a comunidade e o meio ambiente. Isso é particularmente relevante em contextos urbanos, onde a pressão sobre os recursos naturais é intensa e a necessidade de soluções resilientes e sustentáveis é urgente.

A escolha da bacia do Canal do Mangue, no Rio de Janeiro, RJ, como estudo de caso para a avaliação custo-benefício de SDUS, é particularmente pertinente devido às características e desafios específicos dessa região. A bacia do Canal do Mangue enfrenta problemas recorrentes de inundações, especialmente durante os períodos de chuvas intensas, causando prejuízos econômicos significativos e afetando a qualidade de vida dos moradores. A densidade populacional e a urbanização intensa aumentam a vulnerabilidade da área e limitam os espaços livres para implantação de infraestrutura de drenagem.

Além disso, a bacia do Canal do Mangue passou por intervenções de infraestrutura cinzas, com desvios de seus corpos d'água e reservatórios de retenção, que tem um potencial de perder sua eficiência ao longo do tempo com a intensificação das chuvas pelas mudanças climáticas e pela urbanização. Com isso, é importante lançar luz sobre a relevância das áreas privadas urbanas na gestão das águas pluviais e promover a maior percepção dos diversos benefícios associados aos SDUS para o desenvolvimento de políticas públicas de incentivo dessas soluções.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo geral desenvolver uma análise custo-benefício de sistemas de drenagem urbana sustentáveis, aplicados na escala de bacia, considerando seus serviços ecossistêmicos.

1.3.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos são elencados a seguir:

- Quantificar e valorar os benefícios de manejo de águas pluviais e de serviços ecossistêmicos de sistemas de drenagem urbana sustentáveis;
- Identificar as tipologias das edificações na bacia de estudo a fim de delimitar áreas elegíveis de implantação dos sistemas de drenagem urbana sustentáveis;
- Avaliar a influência das cheias urbanas nos preços dos imóveis na bacia de estudo por meio do método dos preços hedônicos a fim de

embasar a valorização imobiliária gerada pelo manejo de águas pluviais;

- Realizar análise custo-benefício e os impactos dos benefícios de serviços ecossistêmicos em seus indicadores.

1.4. TRABALHOS ANTECEDENTES

A presente dissertação conta com trabalhos acadêmicos antecedentes que fizeram parte de seu desenvolvimento ao longo do tempo. O trabalho precursor intitulado *“Cost-benefit Analysis of Sustainable Drainage Systems (SuDS) Considering Ecosystems Services Benefits: Case of Study of Mangue River Watershed in Rio de Janeiro City, Brazil”* foi publicado nos anais da *second latin america conference of sustainable development of energy, water and environment systems (2nd LA-SDEWES)* e posteriormente na revista *Clean Technologies and Environmental Policy* (Fraga et al., 2022). O artigo apresentado na *2nd LA-SDEWES*, recebeu o prêmio de *Best Paper Award* da conferência.

O manuscrito tinha como objetivo desenvolver uma análise custo-benefício de soluções de drenagem sustentáveis aplicados na escala da bacia do Canal do Mangue considerando seus benefícios ecossistêmicos. Foram considerados cenários aplicando telhados verdes, reservatórios de lote e ambas as soluções em conjunto em toda a bacia hidrográfica. Os benefícios ecossistêmicos considerados foram a economia energética oriunda da regulação térmica interna das edificações provida pelo isolamento térmico do substrato dos telhados verdes e o aproveitamento da água de chuva retida pelos reservatórios de lote. Outros benefícios considerados foram a redução do dano anual esperado e a valorização imobiliária providos pela mitigação das cheias.

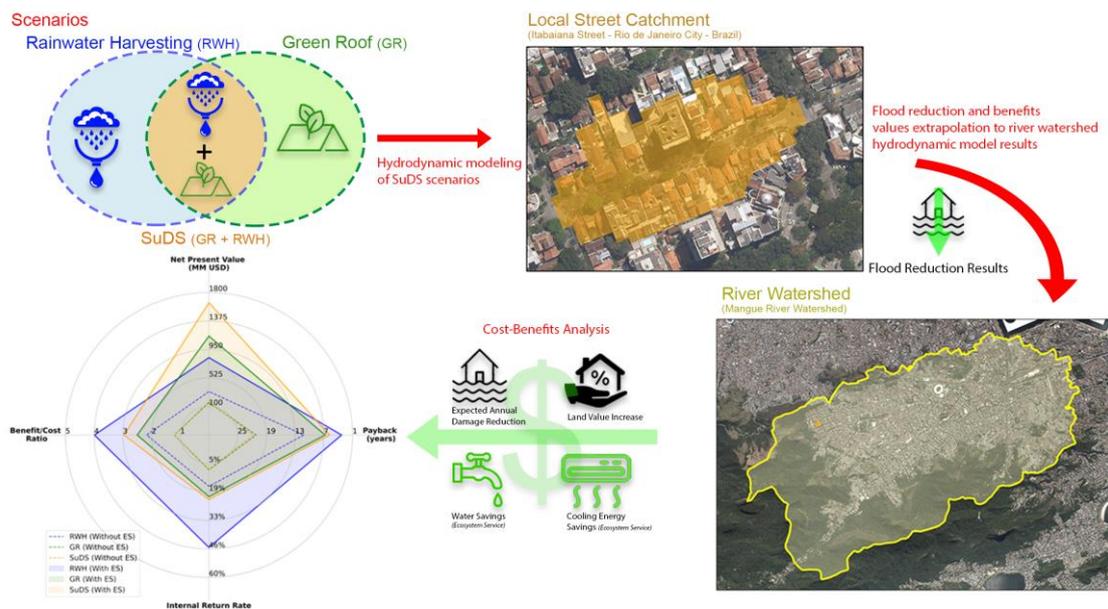
A metodologia consistiu em determinar os efeitos das medidas no escoamento superficial utilizando modelagem hidrológica-hidrodinâmica na escala de rua utilizando a Rua Itabaiana, do bairro de Grajaú, localizada na bacia hidrográfica. Adotando a premissa que a tipologia urbana da Rua Itabaiana é representativa para o restante da bacia, foi aplicada uma redução de lâmina máxima nos resultados de modelagem de toda bacia do Canal do Mangue com base nos valores percentuais de redução de escoamento superficial do modelo da rua. Assim, foram calculados os benefícios provenientes do manejo das águas

pluviais e dos serviços ecossistêmicos. Os indicadores da análise custo-benefício foram o valor presente futura, taxa interna de retorno, tempo de *payback* e relação custo-benefício. O resumo gráfico encontra-se na Figura 1.1.

Os resultados da análise custo-benefício mostraram que os reservatórios de lote teriam, comparativamente, os melhores retornos financeiros. A consideração dos serviços ecossistêmicos teve alto impacto nos indicadores, representando 50,8%, 42,9%, e 36,3% dos benefícios totais dos cenários com ambas as soluções, apenas telhado verde e reservatório de lote, respectivamente.

As principais limitações do artigo foram a ausência de levantamento de tipologias das edificações para avaliar com assertividade as soluções de drenagem urbana distribuída na bacia do Canal do Mangue; a extrapolação da redução de mancha de inundação do modelo da rua para o modelo geral da bacia, associando elevada incerteza nos benefícios relacionados ao manejo das águas pluviais; e a consideração do telhado verde como redução do coeficiente de escoamento superficial, desconsiderando a saturação do seu substrato.

Figura 1.1 - Resumo gráfico do artigo antecedente publicado na revista *Clean Technologies and Environmental Policy*.



Fonte: (Fraga et al., 2019)

Outro trabalho antecedente fundamental para esta dissertação, que foi base para suprir a limitação das tipologias das edificações, foi a dissertação de mestrado de Okumura (2022). A dissertação teve como objetivo estudar soluções sustentáveis para o manejo sustentável da água nas edificações e nos lotes,

promovendo a redução do consumo de água potável e contribuindo para mitigar o risco de cheias em bacias urbanas consolidadas.

Foram definidas estratégias de manejo de águas pluviais intralotes com base nas tipologias das edificações da sub-bacia do Rio Trapicheiros, pertencente à bacia do Canal do Mangue. Com auxílio de imagem de satélite e dados georreferenciados de edificações, foram identificados os diferentes tipos de coberturas, considerando lajes ou telhados, e a disponibilidade de espaços livres no interior dos lotes.

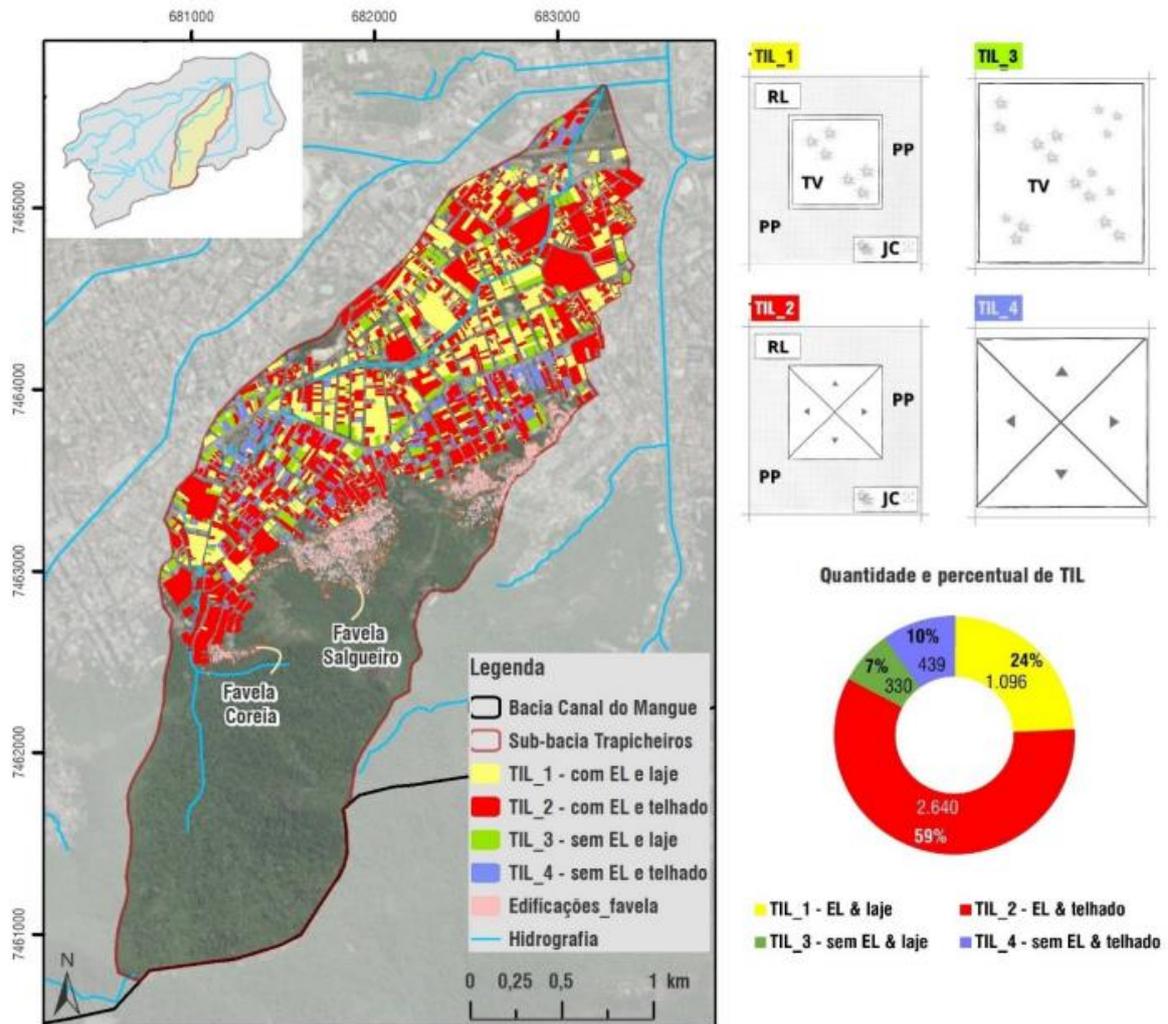
Foram consideradas quatro soluções de drenagem sustentável: telhado verde, jardim de chuva, pavimento permeável e reservatório de lote para retardo e aproveitamento de água de chuva. A implantação de telhados verdes foi considerada apenas em coberturas de lajes, as demais soluções foram condicionadas à presença de espaço livre. Lotes de cobertura de telhado e sem espaços livres não tiveram soluções de drenagem sustentável considerada. O Quadro 1.1 resume as aplicações das soluções por tipologia e a Figura 1.1 mostra o mapa e o qualitativo das tipologias dentro da sub-bacia do Rio Trapicheiros.

Quadro 1.1 - Medidas de controle de escoamento na fonte aplicáveis às tipologias de implantação no lote (TIL).

Tipologias de implantação no lote	Características	Medidas de controle de escoamento na fonte			
		Telhado verde	Jardim de chuva	Pavimento permeável	Reservatório de lote
TIL_1	Com espaço livre privado e laje	✓	✓	✓	✓
TIL_2	Com espaço livre privado e telhado	∅	✓	✓	✓
TIL_3	Sem espaço livre privado e laje	✓	∅	∅	∅
TIL_4	Sem espaço livre privado e telhado	∅	∅	∅	∅

Fonte: Okumura (2022).

Figura 1.2 - Desenhos esquemáticos das tipologias de implantação no lote (TIL), mapeamento na Sub-bacia e quantificação.



Fonte: Okumura (2022)

1.5. METODOLOGIA GERAL

A seguir é descrito brevemente a metodologia aplicada neste trabalho:

- 1) Revisão bibliográfica abrangendo:
 - a. Cheias Urbanas e Danos Associados
 - b. Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis
 - c. Serviços Ecosistêmicos
 - d. Análise de Viabilidade Econômica
- 2) Caracterizar as tipologias das edificações e delimitar áreas elegíveis de implantação das SDUS.
- 3) Construir modelo hidrodinâmico para a bacia hidrográfica

- 4) Definir as precipitações de chuva efetiva de cada célula de escoamento dos cenários de intervenções para inserção no modelo hidrodinâmico
- 5) Quantificar e valorar os benefícios de manejo de águas pluviais de redução do prejuízo anual esperado e valorização imobiliária.
- 6) Quantificar e valorar os benefícios de serviços ecossistêmicos de economia de energia no resfriamento de ambientes internos e de economia de aproveitamento de água pluvial.
- 7) Calcular os indicadores de análise custo-benefício de valor presente líquido, relação custo-benefício, tempo de retorno (*payback*) e taxa interna de retorno.

1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A estrutura deste trabalho encontra-se enumerada a seguir:

O **Capítulo 2** aborda sobre a revisão bibliográfica relacionada às cheias urbanas e seus prejuízos causados, apontando suas causas e consequências; aos sistemas de drenagem urbana sustentáveis, demonstrando conceitos e descrevendo brevemente suas técnicas; aos serviços ecossistêmicos, demonstrando conceitos, citando métodos de valoração; e às análises de viabilidade econômica, citando seus principais métodos e achados na literatura sobre trabalhos relevantes de análise custos-benefícios de sistemas de drenagem urbana sustentáveis.

O **Capítulo 3** apresenta a metodologia aplicada para alcançar os objetivos da pesquisa, enunciando as ferramentas utilizadas e os procedimentos metodológicos.

O **Capítulo 4** caracteriza a Bacia do Canal do Mangue em relação ao seu histórico de intervenções urbanas e eventos de cheias, perante suas características físicas, socioeconômicas e urbanísticas e estudos e planos existentes relevantes ao tema.

O **Capítulo 5** mostra os resultados obtidos, descrevendo os resultados obtidos de tipologias construtivas, os impactos no manejo de águas pluviais dos cenários de intervenções, dos testes dos modelos de regressões e dos indicadores da análise de custo-benefício

O **Capítulo 6** discorre sobre a discussão dos resultados, apontando os principais achados da aplicação da metodologia, suas implicações e as limitações do trabalho.

O **Capítulo 7** apresenta as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CHEIAS URBANAS E DANOS ASSOCIADOS

As cheias urbanas representam um dos desafios mais críticos para as áreas urbanizadas, resultando de um conjunto complexo de fatores, incluindo o aumento das superfícies impermeáveis, a ocupação de áreas suscetíveis a inundações e as mudanças climáticas. Esses eventos são caracterizados pelo rápido acúmulo de água nas áreas urbanas, ultrapassando a capacidade dos sistemas de drenagem, o que leva a inundações que podem causar danos significativos à infraestrutura, propriedades e à saúde pública.

As consequências das cheias urbanas vão além dos danos físicos imediatos, afetando também a economia local, a qualidade de vida dos residentes e os ecossistemas urbanos. Este capítulo explora a natureza das cheias urbanas, os fatores que contribuem para sua ocorrência e os diversos tipos de danos associados, destacando a importância de estratégias eficazes de gestão e mitigação para reduzir seu impacto.

2.1.1. Causas das cheias urbanas

Por conta de suas terras férteis, transporte hidroviário e disponibilidade de água, os locais de entorno de rios sempre foram atrativos para o desenvolvimento urbano (Miguez; Magalhães, 2010). Grandes civilizações antigas se desenvolveram ao longo de rios importantes. Por exemplo, a Mesopotâmia se estabeleceu entre os rios Tigre e Eufrates, aproveitando a irrigação natural para agricultura (Algaze, 2008). Já a China se estabeleceu ao longo dos rios Huang He (Rio Amarelo) e Yangtze, com o uso de suas águas para cultivo e transportes (Zheng, 2014). O Egito Antigo, com sua prosperidade derivada de cheias do Rio Nilo, com seu solo fértil em suas margens, é outro exemplo clássico (Macklin; Lewin, 2015).

O processo de desenvolvimento urbano aumenta as superfícies impermeáveis, impactando no ciclo hidrológico das bacias hidrográficas, reduzindo infiltração da água e aumentando a intensidade e velocidade do escoamento superficial. Como consequência modifica os padrões das inundações de seus rios, fenômeno natural e de importância ambiental (Miguez; Magalhães, 2010), alterando sua abrangência e frequência. O efeito da urbanização sobre as inundações decresce em termos relativos à proporção que o tempo de recorrência aumenta, por conta do limite de infiltração e interceptação em casos de chuvas muito severas. A urbanização pode aumentar até mais de 10 vezes as vazões de eventos de inundações de menor porte e eventos de maiores tempos de recorrência¹ podem dobrar suas vazões com a impermeabilização de 30% da área da bacia (Hollis, 1975).

Além da modificação do ciclo hidrológico, a urbanização que negligencia os processos naturais das inundações, ocupando as regiões de várzeas dos rios, reduz a capacidade de armazenamento de água durante inundações e, quando ocupando suas margens, acabam reduzindo sua capacidade hidráulica, aumentando o risco de cheias tanto localmente quanto em áreas a jusante. (Huang, 2019; Mardin; Shen, 2019) Além disso, essa prática aumenta a exposição ao perigo de inundações, elevando o risco associado (Schober; Hauer; Habersack, 2020).

Na tentativa de mitigar as crescentes cheias urbanas, as cidades acabam focando na implantação de medidas estruturais com a lógica tradicional de drenagem urbana, com o foco na rápida captação e transporte dos volumes de chuva por meio de canalização, retificação de rios e implantação de galerias de águas pluviais. Tais intervenções, se não bem planejadas, podem acarretar à transferência das cheias para regiões de jusante da cidade.

¹ **Tempo de recorrência** é o intervalo médio em que um determinado evento hidrológico se reproduz ou é superado. Matematicamente, é o inverso da probabilidade de um determinado evento hidrológico ser igualado ou excedido em um ano qualquer. Por exemplo, um evento de precipitação com um tempo de recorrência de 100 ano tem uma probabilidade de 1% de ocorrer em qualquer ano dado.

Figura 2.1 - Processo de impactos da urbanização.



Fonte: (Nagem, 2008).

Além da urbanização, as mudanças climáticas representam outro fator de agravamento das cheias urbanas. Com a crescente emissões de gases de efeitos estufa por meio de queima de combustíveis fósseis, desmatamento, práticas agrícolas e pecuárias, e outras práticas; é esperado que haja um aumento da temperatura global e elevação do nível médio do mar (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014).

A elevação da temperatura atmosférica provoca maiores acúmulos de vapor d'água, o que pode ocasionar em chuvas mais intensas e frequentes (Trenberth, 2011). Além disso, há a alteração dos padrões de precipitação, com algumas áreas experimentando secas severa enquanto outras, chuvas excessivas (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014). Já a elevação do nível médio do mar, por conta do derretimento das calotas polares, de geleiras e da expansão térmica da água, aumenta os riscos às inundações costeiras de regiões urbanas de baixada (Church; White, 2011)

Em comparação com as mudanças climáticas, a urbanização tem um impacto mais imediato e significativo no aumento do risco de cheias, devido à rápida expansão das áreas impermeáveis e ao desenvolvimento inadequado de infraestrutura de drenagem. Zhou *et al.* (2019) avaliaram os impactos das cheias de cenários de aumento de impermeabilização por urbanização e cenários futuros de mudanças climáticas por meio de simulações hidrológicas e hidráulicas. Seu trabalho concluiu que a urbanização resultou num aumento de volume de inundação anual esperado entre 194% e 942%, com valor médio de 471%, enquanto os cenários de mudanças climáticas aumentaram em 36% a 794%, com valor médio de 299%.

2.1.2. Consequências das Cheias Urbanas

Cheias urbanas são desastres hidrológicos que podem resultar em perdas significativas de vidas humanas, danos à infraestrutura, e impactos negativos no meio ambiente. A intensidade e a frequência desses eventos estão aumentando devido às mudanças climáticas e à urbanização descontrolada. Exemplos de desastres hidrológicos incluem a destruição de edifícios, a perda de veículos, e a interrupção de serviços essenciais, como energia elétrica e abastecimento de água (Crawford *et al.*, 2022).

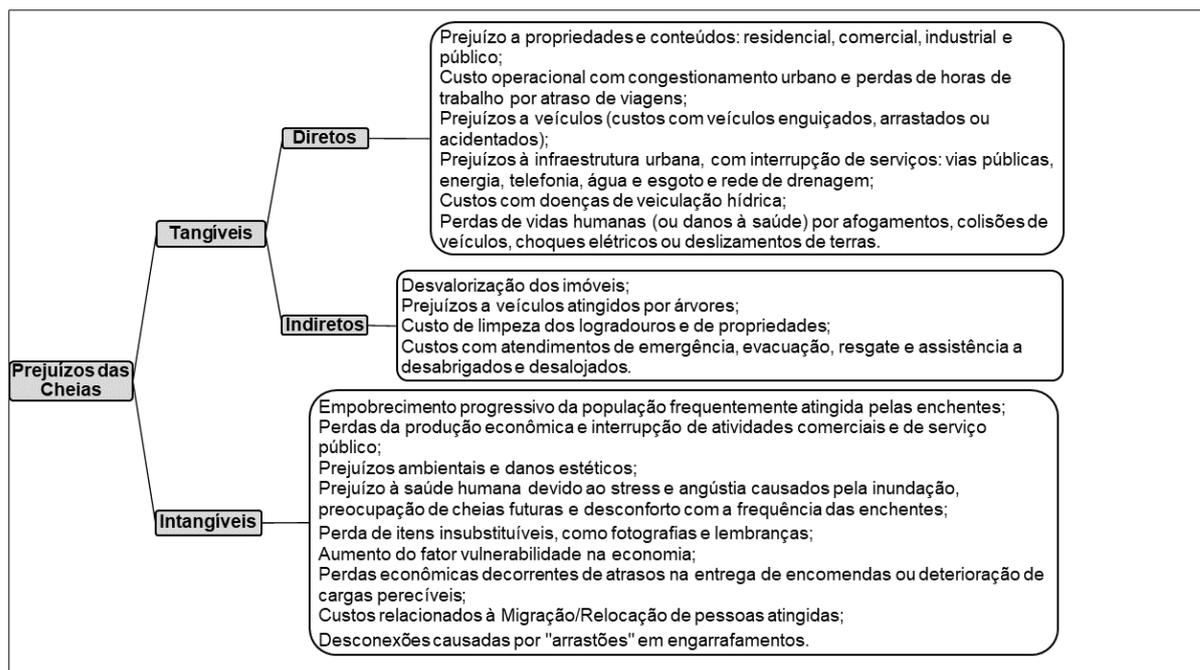
Os fatores das cheias urbanas e urbano determinantes na quantificação de dano causado são descritos a seguir (Nagem, 2008):

- **Altura da Inundação:** A profundidade da água durante uma inundação é um dos principais fatores na avaliação dos danos causados. É uma métrica simples de ser utilizada, sendo por isso a mais comum nas análises de danos. A altura da inundação determina a extensão dos estragos, como se as águas vão se restringir às vias públicas ou se invadirão edificações.
- **Velocidade do Escoamento:** A velocidade com que a água escoar também aumenta significativamente os danos. As forças geradas por escoamentos rápidos podem derrubar pessoas, causar erosões, aumentar o transporte de sedimentos e detritos, e até danificar estruturas. Esse fator é mais crítico em áreas com declives acentuados e próximas a diques.

- **Duração da Cheia:** O tempo de duração de uma inundação afeta diretamente a vida das pessoas nas áreas afetadas. Quanto mais tempo a água permanece, maiores são os danos, a propagação de doenças e o número de pessoas desalojadas.
- **Frequência das Inundações:** A frequência com que ocorrem inundações pode ser vista de duas maneiras: períodos longos entre eventos ou inundações frequentes. Longos intervalos entre inundações podem levar os moradores a esquecerem do risco e a se desprepararem. Inundações frequentes podem resultar em danos acumulados e não reparados, potencializando os prejuízos.
- **Carga de Poluentes:** A presença de poluentes na água das enchentes, como organismos patogênicos ou substâncias tóxicas, aumenta os riscos para a saúde pública. Além disso, o transporte de sedimentos e detritos agrava os danos ao dificultar o escoamento da água.
- **Tipo de Ocupação do Solo:** A natureza do uso do solo afeta diretamente a gravidade dos danos. Áreas comerciais sofrem diferentes tipos de prejuízos em comparação com áreas residenciais. Regiões com diferentes tipos de habitação (casas versus prédios) e diferentes níveis socioeconômicos terão variações nos danos. A densidade populacional e a sazonalidade da ocupação, como em áreas turísticas, também influenciam a intensidade dos danos.
- **Perfil Socioeconômico:** O perfil socioeconômico da área afetada influencia a magnitude dos prejuízos. Regiões mais desenvolvidas tendem a sofrer perdas financeiras maiores durante as enchentes. As características das construções e os bens contidos nelas estão diretamente relacionados ao padrão de vida da região.

Os prejuízos causados por cheias urbanas podem ser classificados conforme Figura 2.2.

Figura 2.2 - Classificação de prejuízos de cheias urbanas.



Fonte: (Nagem, 2008)

Os danos diretos causados por cheias urbanas incluem a destruição física de propriedades, infraestrutura e veículos. Esses danos são frequentemente quantificados em termos monetários e podem ser substanciais. Danos diretos envolvem também a perda de equipamentos e materiais que entram em contato direto com a água da enchente (Martínez-Gomariz *et al.*, 2019). Já os danos indiretos resultam de impactos que não são causados diretamente pela água, mas pelas consequências das cheias, como interrupções econômicas devido à perda de produtividade, aumento dos custos de transporte, e problemas de saúde devido à contaminação da água. Esses danos podem se estender por longos períodos após o evento inicial (Arrighi; Pregnotato; Castelli, 2021).

Danos tangíveis são aqueles que podem ser diretamente medidos em termos financeiros, como a destruição de propriedades, infraestrutura e veículos. Esses danos incluem custos de reparo e substituição de bens danificados (Frongia; Sechi; Davison, 2016). Já os danos intangíveis são mais difíceis de quantificar, pois envolvem impactos não materiais, como o estresse psicológico, perda de bem-estar, e impactos na saúde mental dos afetados. Por exemplo, estudos mostraram que eventos de cheias podem causar traumas de longo prazo e perda de confiança nas autoridades locais (Lekuthai; Vongvisessomjai, 2001). Além

disso, a interrupção de serviços essenciais, como saúde e educação, pode ter efeitos prolongados e profundos na qualidade de vida das pessoas (Nithila; Shome; Islam, 2022).

2.2. SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEIS

Para mitigar as inundações urbanas, geralmente são utilizados sistemas convencionais de drenagem que focam em medidas estruturais para rapidamente direcionar o aumento dos fluxos por meio da canalização, e em medidas de armazenamento que reduzem os picos de vazão através de reservatórios de detenção ou retenção. No entanto, com a expansão urbana, essas soluções perdem eficiência, pois a ocupação de bacias hidrográficas limita a ampliação de rios e áreas de armazenamento, exigindo ações diferenciadas e investimentos mais altos para a adaptação dos sistemas existentes (Yazdanfar; Sharma, 2015).

Rompendo esse paradigma, os Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis (SDUS) visam promover o desenvolvimento preservando as condições do ciclo hidrológico natural, seguindo os princípios do desenvolvimento de baixo impacto (*LID*) (Fletcher *et al.*, 2015). Os SDUS consistem em combinar práticas e tecnologias de águas pluviais para atingir seus quatro pilares: qualidade da água, quantidade de água, amenidade e biodiversidade (Ballard *et al.*, 2015) atendendo a objetivos técnicos, sociais, econômicos, ambientais e políticos, sem transferência de prejuízos de cheias no espaço ou tempo (Miguez; Magalhães, 2010).

Os Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (SDUS) são projetados para imitar processos naturais como infiltração, evapotranspiração e reutilização de água, minimizando os impactos negativos das águas pluviais em áreas urbanas. Estes sistemas são essenciais para aumentar a resiliência das cidades frente às mudanças climáticas e ao crescimento urbano acelerado.

2.2.1. Evolução do Conceito de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis

Com as modificações dos paradigmas da urbanização e suas práticas de manejo de águas pluviais, os conceitos e terminologia dos SDUS foram evoluindo ao longo dos anos. Tais termos são descritos a seguir:

Melhores Práticas de Gestão (BMPs) foi introduzido na Lei de Água Limpa (*Clean Water Act*) em 1972, embora nunca tenha sido explicitamente definido. A expressão "*better management practices*" data de 1949, inicialmente usada para a gestão de terras agrícolas visando restaurar uma cobertura vegetal favorável e estrutura do solo para manter condições de terra e riachos adequadas.

Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) teve o primeiro uso em um relatório sobre planejamento de uso do solo da cidade de Vermont, nos Estados Unidos, em 1977 e ficou popular na América do Norte. O objetivo do LID é minimizar os custos do manejo de águas pluviais por meio de conceito de “projetar com a natureza”, tentando limitar o escoamento gerado pelos loteamentos para valores de pré-desenvolvimento. LID é caracterizado por medidas de baixa escala, como sistemas de biorretenção, telhados verdes, trincheiras localizadas na fonte do escoamento.(Fletcher *et al.*, 2015)

Desenho Urbano Sensível à Água (WSUD) teve seu primeiro uso em um relatório da Austrália em 1992 e 1994. Um conceito mais abrangente que integra a gestão da água urbana ao planejamento e design urbanos para melhorar a sustentabilidade e resiliência. WSUD aborda não apenas a drenagem de águas pluviais, mas também o uso da água e a conservação de recursos hídricos. Lloyd, Wong e Chesterfield (2002) descreve WSUD como:

abordagem filosófica de planejamento e design urbano que visa minimizar os impactos hidrológicos do desenvolvimento urbano no ambiente circundante. A gestão de águas pluviais é um subconjunto do WSUD voltado para fornecer controle de inundações, gerenciamento de fluxo, melhorias na qualidade da água e oportunidades para captação de águas pluviais para complementar o abastecimento de água potável para usos não potáveis.

Assim, WSUD engloba a gestão de água pluviais e abrange todos os aspectos da gestão integrada do ciclo urbano da água; sendo práticas de escalas maiores que LID. Muitos confundem o termo com “Cidades Sensíveis à Água”, porém esse descreve o estado ou objetivo que se deseja alcançar, enquanto WSUD descreve as técnicas. (Fletcher *et al.*, 2015)

Sistemas Sustentáveis de Drenagem Urbana (SUDS) refere-se a sistemas de drenagem sustentáveis que buscam replicar o ciclo hidrológico natural e

minimizar o impacto ambiental da urbanização. SUDS incluem técnicas como bacias de retenção, valas de infiltração e áreas úmidas construídas.

Infraestrutura Verde (GI), um conceito que vai além da gestão de águas pluviais, introduz a percepção de múltiplos benefícios ambientais, sociais e econômicos oriundos da integração de espaços verdes urbanos ao desenho urbano com potencial mitigação de cheias urbanas. É definida como uma rede de práticas de gestão descentralizada de águas pluviais, como telhados verdes, árvores, jardins de chuva e pavimentos permeáveis, que podem capturar e infiltrar a chuva onde ela cai, reduzindo assim o escoamento de águas pluviais e melhorando a saúde das vias navegáveis ao redor. Este conceito é cada vez mais relacionado aos objetivos ambientais ou de sustentabilidade que as cidades estão tentando alcançar através de abordagens naturais (Vujičić *et al.*, 2024).

Soluções baseadas na Natureza (SbN) são ações voltadas para enfrentar desafios sociais por meio da proteção, gestão sustentável e restauração de ecossistemas, proporcionando benefícios tanto para a biodiversidade quanto para o bem-estar humano. Esse conceito abrange uma abordagem sistêmica que busca restaurar ou criar novos ciclos de feedback entre sistemas sociais, ecológicos e tecnológicos no ambiente urbano, permitindo a entrega de múltiplos co-benefícios nos domínios social, ecológico e econômico. (Mcphearson; Kabisch; Frantzeskaki, 2023)

A definição amplamente aceita da *International Union for Conservation of Nature* (IUCN) descreve SbN como:

ações para proteger, gerenciar de forma sustentável e restaurar ecossistemas naturais ou modificados, que abordam desafios sociais de maneira eficaz e adaptativa, proporcionando simultaneamente bem-estar humano e benefícios para a biodiversidade. (Mcphearson; Kabisch; Frantzeskaki, 2023)

As soluções baseadas na natureza (SbN) para drenagem urbana focam em integrar processos naturais para gerenciar a água e aumentar a resiliência contra inundações. Essas soluções têm como objetivo replicar, tanto quanto possível, os ciclos naturais da água, reduzindo o impacto da urbanização na hidrologia. Ao incorporar elementos como telhados verdes, jardins de chuva e pavimentos permeáveis, as SbN ajudam a gerenciar o escoamento pluvial, melhorar a

qualidade da água e proporcionar múltiplos benefícios ecológicos e sociais. (Herzog; Freitas; Wiedman, 2022)

Um modelo de desenvolvimento urbano que vem sendo muito difundido na literatura é o modelo de **idades esponjas** (*sponge cities*). O modelo tem como objetivo mitigar os impactos da urbanização nos ecossistemas naturais e solucionar problemas relacionados à água simultaneamente com uso de infraestruturas verdes e desenvolvimento urbano de baixo impacto, buscando equacionar problemas no local onde são gerados. Este modelo é altamente adequado em climas caracterizados por períodos de chuvas intensas e de seca, como clima tropical, subtropical úmido e monçônico.

O modelo de cidades esponjas contém quatro princípios fundamentais: (1) captação da água pluvial, por meio da absorção e armazenamento para seu aproveitamento e reduzir escoamentos superficiais; (2) gestão ecológica da água, restaurando a qualidade da água por meio de sistemas de autopurificação; (3) infraestruturas verdes a fim de promover a infiltração da água no solo, reduzindo o escoamento e melhorando a recarga dos aquíferos; (4) pavimentos permeáveis para pavimentação de ruas, calçadas e estacionamentos, permitindo que a água da chuva infiltre no solo em vez de escorrer para os sistemas de drenagem, diminuindo o risco de inundações e melhorando a qualidade da água subterrânea. (Nguyen *et al.*, 2019)

Um país pioneiro na adoção deste modelo é a China, que lançou um programa de cidades esponjas, o qual selecionou 30 áreas urbanas como projetos-piloto. A meta é adotar o modelo em 80% da área urbana até 2030 e absorver ou aproveitar pelo menos 70% do volume de chuva pelo aumento da permeabilidade, retenção, armazenamento, purificação e sistemas de drenagem. (Nguyen *et al.*, 2019)

2.2.2. Técnicas e Práticas de Drenagem Urbana Sustentável

Os SUDS utilizam uma variedade de técnicas e práticas para alcançar seus objetivos, incluindo:

2.2.2.1. Telhados Verdes

Telhados Verdes são superfícies vegetadas instaladas sobre telhados que ajudam a reter e filtrar a água da chuva. Eles oferecem múltiplos benefícios, incluindo a gestão das águas pluviais, a redução do efeito de ilha de calor urbana e a melhoria da qualidade do ar. Estudos demonstraram que telhados verdes podem reter entre 10% a 60% do volume de escoamento durante diferentes eventos de chuva, dependendo da intensidade e duração das precipitações (Shafique; Kim; Kyung-Ho, 2018). Além disso, telhados verdes com substratos mais profundos oferecem uma capacidade de retenção maior, sendo particularmente eficazes em áreas altamente urbanizadas (Zhang *et al.*, 2021).

2.2.2.2. Reservatórios de Lote

Reservatórios de Lote são estruturas de armazenamento de água em terrenos urbanos que reduzem o escoamento. Eles podem ser instalados em terrenos residenciais, comerciais ou industriais e são projetados para capturar e armazenar água da chuva, que pode ser usada para irrigação ou outros fins não potáveis. Esses reservatórios ajudam a reduzir a carga sobre os sistemas de drenagem urbana e a minimizar os riscos de inundações locais.

Além do manejo de águas pluviais, os reservatórios de lote podem fornecer água para usos não potáveis e podem recarregar as águas subterrâneas por irrigação (García-Montoya *et al.*, 2016; Stout; Walsh; Burian, 2017).

Na escala de bairro, o SUDS tem potencial para gerar benefícios mais amplos, como redução do consumo de energia pelos sistemas de abastecimento de água e esgoto, redução de custos em infraestrutura cinza e também redução da emissão de carbono associada a esses processos. (Johnson; Geisendorf, 2019)

2.2.2.3. Jardins de Chuva

Jardins de chuva ou biorretenção são áreas vegetadas projetadas para capturar e tratar o escoamento superficial. Eles funcionam como bacias de infiltração onde a água é temporariamente armazenada, permitindo que sedimentos e poluentes sejam filtrados antes de a água infiltrar no solo ou ser direcionada para sistemas de drenagem. Estudos indicam que jardins de chuva podem reduzir

significativamente o volume de escoamento e melhorar a qualidade da água (Roy-Poirier *et al.*, 2010).

2.2.2.4. Pavimentos Permeáveis

Pavimentos Permeáveis são superfícies pavimentadas que permitem a infiltração de água. Diferentemente dos pavimentos tradicionais, que são impermeáveis, os pavimentos permeáveis ajudam a reduzir o escoamento superficial, promovendo a recarga das águas subterrâneas. Eles podem ser usados em estacionamentos, calçadas e vias de acesso, contribuindo para a gestão sustentável das águas pluviais em áreas urbanas.

Embora o SUDS possa mitigar os impactos no ciclo hidrológico da urbanização por *retrofit* ou fornecer desenvolvimento urbano de baixo impacto, essas soluções são frequentemente vistas em países desenvolvidos, como Austrália, Estados Unidos (Roy *et al.*, 2018) Reino Unido (Melville-Shreeve *et al.*, 2018) e em países europeus (Gimenez-Maranges; Breuste; Hof, 2020). Porém, em países em desenvolvimento, como o Brasil, essas soluções sustentáveis ainda não são contempladas nos atuais instrumentos legais de manejo de águas pluviais (Barros Ramalho Alves *et al.*, 2020) principalmente pela falta de políticas de incentivo.

2.3. SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS

Os serviços ecossistêmicos (SE) consistem em benefícios gerados pela natureza que são, benéficos ao bem-estar humano; fisicamente, mentalmente (Haase, 2021) e socialmente (Geneletti *et al.*, 2020). Os SE podem ser categorizados em quatro tipos de serviços: provisão, regulação, serviços culturais e de apoio, conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Categorias de serviços ecossistêmicos.

TIPO	CONCEITOS	SERVIÇOS
Provisão	Produtos obtidos do ecossistema, cuja quantidade tem crescido rapidamente em taxas insustentáveis.	Alimentos
		Fibras
		Recursos genéticos
		Bioquímicos, recursos naturais, etc.
		Recursos ornamentais
Regulação	Benefícios obtidos de processos reguladores do ecossistema, que foram substancialmente modificados pelos humanos, especialmente a regulação climática devido ao aumento de	Regulação da qualidade do ar
		Regulação climática
		Regulação da água
		Regulação da erosão
		Regulação de doenças
		Regulação de pragas

TIPO	CONCEITOS	SERVIÇOS
	dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa.	Polinização
Cultural	Benefícios não materiais obtidos do ecossistema através de enriquecimento espiritual, desenvolvimento cognitivo, reflexão, recreação e experiências estéticas.	Diversidade cultural
		Valores espirituais e religiosos
		Recreação e ecoturismo
		Valores estéticos
		Sistemas de conhecimento
Apoio	Necessários para gerar outros serviços ecossistêmicos, com impactos indiretos e de longo prazo.	Valores educacionais
		Formação do solo
		Fotossíntese
		Produção primária
		Ciclagem de nutrientes
		Ciclagem da água

Fonte: (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Shuster; Garmestani, 2015)

Os serviços de provisão são os produtos materiais diretos que os ecossistemas fornecem. Esses serviços são essenciais para a subsistência e o desenvolvimento econômico das sociedades humanas. Exemplos de serviços de provisão incluem a produção de alimentos, como vegetais, frutas, carnes e peixes, que são fundamentais para a alimentação humana. Além disso, a provisão de água potável e para irrigação é crucial para a sobrevivência e a agricultura. Outros exemplos incluem a produção de fibras e materiais, como madeira e fibras naturais, que são utilizados em diversas indústrias, a produção de combustíveis, como a biomassa para bioenergia, e a extração de produtos bioquímicos utilizados em medicamentos e cosméticos. O material genético também é um serviço de provisão importante, fornecendo recursos para o melhoramento de plantas e o desenvolvimento de novos medicamentos.

Os serviços de regulação são os benefícios obtidos pela regulação dos processos ecossistêmicos. Esses serviços são cruciais para manter o equilíbrio ambiental e a saúde dos ecossistemas. A regulação do clima, por exemplo, envolve o controle da temperatura e a regulação dos padrões climáticos globais e locais, ajudando a mitigar os efeitos das mudanças climáticas. O controle de inundações é outro serviço vital, reduzindo a magnitude e a frequência das inundações através da absorção e retenção de água em áreas como zonas úmidas e florestas. A purificação da água é um serviço essencial que envolve a filtragem e remoção de poluentes e sedimentos da água por meio de processos naturais em ecossistemas aquáticos. O controle de erosão previne a perda de solo e a sedimentação em corpos d'água, protegendo tanto a terra quanto os cursos d'água. A regulação da qualidade do ar é realizada pela absorção de

poluentes atmosféricos por plantas e solo, contribuindo para a manutenção de um ambiente saudável. Além disso, o controle biológico é um serviço importante que envolve a regulação de pragas e doenças através de predadores naturais e outros mecanismos ecológicos.

Os serviços culturais são os benefícios imateriais obtidos dos ecossistemas por meio do enriquecimento espiritual, desenvolvimento cognitivo, reflexão, recreação e experiências estéticas. Esses serviços incluem a provisão de locais para recreação e atividades ao ar livre, como parques e reservas naturais, que oferecem oportunidades para o lazer e a atividade física, promovendo a saúde mental e física. A beleza estética dos ecossistemas naturais também proporciona inspiração artística e valorização cultural, influenciando a arte, a literatura e outras formas de expressão humana. Além disso, os ecossistemas têm importância espiritual e religiosa para muitas culturas, servindo como locais sagrados e fontes de significado espiritual. A educação ambiental e a pesquisa científica são outro aspecto dos serviços culturais, com ecossistemas naturais oferecendo oportunidades para aprendizado e investigação científica, promovendo uma maior compreensão e apreciação do mundo natural (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Os serviços de apoio são aqueles necessários à produção de todos os demais serviços ecossistêmicos, com impactos indiretos e de longo prazo. Eles incluem a formação de solo, que é essencial para a produção agrícola e a sustentação de vegetação natural. O ciclo de nutrientes é outro serviço de apoio crucial, envolvendo a decomposição e reciclagem de nutrientes essenciais para a fertilidade do solo e a produtividade das plantas. A produção primária, que se refere à produção de biomassa através da fotossíntese em plantas e fitoplâncton, fornece a base energética para quase todas as cadeias alimentares. Finalmente, a provisão de habitat para a biodiversidade é um serviço de apoio fundamental, oferecendo refúgios e locais de reprodução para uma vasta gama de espécies, mantendo a biodiversidade e a resiliência dos ecossistemas. (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

2.3.1. Serviços Ecossistêmicos de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis

Em um contexto de serviços ecossistêmicos relacionados à água, alguns exemplos de serviços seriam o fornecimento de insumos de água para o ciclo hidrológico urbano como serviços de provisão; a regulação de escoamento em um ciclo hidrológico urbano pela permeabilidade da superfície como serviços de regulação; irrigação e regulação dos ciclos de nutrientes como serviços de apoio; e criação de oportunidades recreativas e estéticas como serviços culturais (Shuster; Garmestani, 2015). Alguns serviços estão relacionados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Categorias de serviços ecossistêmicos relacionados aos SDUS.

TIPO	SERVIÇOS RELACIONADOS AOS SDUS
Provisão	Aproveitamento de água de chuva Agricultura urbana
Regulação	Controle de inundações Melhoria da qualidade de água Regulação do clima
Cultural	Recreação, Melhoria estética, Educação ambiental
Apoio	Habitat e biodiversidade, Melhoria do ciclo de nutrientes

Fonte: (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Além dos benefícios para a gestão de águas pluviais, os sistemas de drenagem urbana sustentável (SDUS) criam oportunidades para melhorar os serviços ecossistêmicos urbanos. Um **telhado verde**, por exemplo, pode proporcionar serviços ecossistêmicos devido ao seu substrato e vegetação, tais como: produção de alimentos (agricultura urbana); economia de energia por resfriamento ou aquecimento de ambientes internos; redução de custos de manutenção do telhado; melhoria da qualidade do ar; diminuição do efeito de ilha de calor urbana e do ruído urbano (absorvido pela estrutura); oportunidades estéticas e de recreação (CNT, 2010; Johnson; Geisendorf, 2019); e habitat para a fauna urbana.

Reservatórios de lote, por sua vez, podem fornecer água para usos não potáveis e podem recarregar o lençol freático por meio da irrigação (García-Montoya *et al.*, 2016; Stout; Walsh; Burian, 2017).

Jardins de chuva, por exemplo, oferecem uma variedade de serviços ecossistêmicos devido à sua capacidade de infiltração e ao uso de plantas nativas. Esses benefícios incluem: melhoria da qualidade da água ao filtrar poluentes e sedimentos; recarga do lençol freático através da infiltração; redução

do risco de enchentes ao desacelerar o escoamento superficial; criação de habitats para a fauna local, como insetos polinizadores e aves; aumento da biodiversidade urbana; oportunidades de recreação e estética para os residentes; e melhoria da qualidade do ar e do microclima local. Jardins de chuva também podem ser integrados ao paisagismo urbano, contribuindo para a resiliência ambiental e a sustentabilidade das cidades (CNT, 2010; Johnson; Geisendorf, 2019).

Pavimentos Permeáveis oferecem benefícios significativos para a gestão de águas pluviais e para a melhoria dos serviços ecossistêmicos urbanos. Esses pavimentos permitem que a água da chuva infiltre no solo, reduzindo o escoamento superficial e diminuindo a pressão sobre os sistemas de drenagem convencionais. Os benefícios incluem: recarga do lençol freático; diminuição da poluição das águas superficiais ao filtrar contaminantes; mitigação do efeito de ilha de calor urbana através da evapotranspiração; aumento da durabilidade e menor necessidade de manutenção em comparação com pavimentos tradicionais; e criação de um ambiente urbano mais verde e agradável. Além disso, pavimentos permeáveis podem ser usados em diversos contextos, como estacionamentos, calçadas e ruas residenciais, contribuindo para a sustentabilidade e a resiliência das infraestruturas urbanas. (García-Montoya *et al.*, 2016; Stout; Walsh; Burian, 2017).

Em nível de bairro, os SDUS têm o potencial de gerar benefícios mais amplos, como a redução do consumo de energia pelos sistemas de abastecimento de água e esgoto, a redução de custos em infraestrutura cinza e a redução de emissões de carbono associadas a esses processos. Essas medidas também podem melhorar o ambiente construído, aumentando o valor das áreas urbanas revitalizadas. (Johnson; Geisendorf, 2019)

2.3.2. Valoração dos Serviços Ecossistêmicos

A valoração dos serviços ecossistêmicos é essencial para a formulação de políticas ambientais eficazes, para a gestão sustentável dos recursos naturais e para comunicação de benefícios.

Seus métodos podem ser baseados ou não em valores de mercado. Os métodos de valoração baseadas no mercado utilizam transações (diretos) e

comportamentos (indiretos) do mercado existente para inferir o valor dos serviços ecossistêmicos. (Koetse; Brouwer; Van Beukering, 2015)

Os métodos baseados no mercado diretos são: o uso direto de preços de mercado, função de fator de renda líquida e função de produção, custo de substituição; despesas defensivas e custos evitados.

Já os métodos de valoração baseado no mercado indiretos, também chamados de métodos de preferências reveladas, são baseados no comportamento do consumidor ou produtor e identifica a influência do serviço ecossistêmico sobre o mercado de outro bem. Exemplos são: métodos dos preços hedônicos e custo de viagem. (Koetse; Brouwer; Van Beukering, 2015)

Já os métodos não baseados no mercado, também chamado de métodos de preferências declaradas, utilizam-se de questionários para compreender suas preferências por mudanças hipotéticas na provisão de serviços ecossistêmicos. Exemplos são: método da valoração contingente e método de experimentos de escolha.

2.3.2.1. Função de Fator de Renda Líquida e Função de Produção

A função de fator de renda líquida calcula o valor de um serviço ecossistêmico medindo sua contribuição direta para a geração de renda em um setor específico da economia. Este método é particularmente útil quando os serviços ecossistêmicos são insumos na produção de bens ou serviços. Por exemplo, a água utilizada na agricultura pode ser valorizada calculando a diferença na renda agrícola com e sem o uso da água para irrigação. Este método se baseia em dados de mercado reais, como receitas de vendas e custos de produção, permitindo uma medida objetiva da contribuição do serviço ecossistêmico para a economia. De acordo com (Koetse; Brouwer; Van Beukering, 2015), a função de produção estima o valor de um serviço ecossistêmico determinando sua contribuição para a produção de bens ou serviços. Essa metodologia envolve a modelagem da relação entre insumos, incluindo serviços ecossistêmicos, e a produção final. Por exemplo, a polinização realizada por abelhas pode ser valorizada analisando seu impacto na produtividade agrícola. Modelos econométricos ou funções de produção específicas são utilizados para

quantificar como variações na provisão de serviços ecossistêmicos afetam a produção e, conseqüentemente, o valor econômico desses serviços.

2.3.2.2. Custo de Substituição

O custo de substituição calcula o valor de um serviço ecossistêmico com base no custo de substituí-lo por um serviço ou bem equivalente produzido pelo homem. Este método é aplicado quando há alternativas artificiais disponíveis. Por exemplo, o valor da purificação natural da água por um ecossistema pode ser estimado com base no custo de construir e operar uma estação de tratamento de água que forneça um serviço equivalente. Esta abordagem fornece uma estimativa prática do valor econômico dos serviços ecossistêmicos, considerando os custos reais de tecnologias substitutas. Segundo Legesse, Degefa e Soromessa (2022), esse método é eficaz para determinar o valor de serviços que possuem alternativas claras e quantificáveis.

2.3.2.3. Despesas Defensivas e Custos Evitados

As despesas defensivas baseiam-se nas despesas realizadas para evitar os efeitos adversos da perda de serviços ecossistêmicos. Este método calcula o valor dos serviços ecossistêmicos considerando os custos incorridos para mitigar ou prevenir danos que resultariam de sua degradação ou perda. Por exemplo, os custos de construção de barreiras contra inundações para substituir a proteção natural oferecida por manguezais ou pântanos são usados para valorar esses ecossistemas. Já os custos evitados calculam o valor dos serviços ecossistêmicos com base nos custos que seriam incorridos se esses serviços não estivessem disponíveis. Este método considera os gastos que seriam necessários para lidar com os problemas decorrentes da perda de serviços ecossistêmicos. Por exemplo, o valor das florestas na prevenção de deslizamentos de terra pode ser estimado com base nos custos evitados de reparos de infraestrutura e mitigação de danos após um deslizamento. Ambos os métodos são descritos por (Koetse; Brouwer; Van Beukering, 2015) como formas práticas e diretas de quantificar os benefícios econômicos dos serviços ecossistêmicos ao evitar custos adicionais.

2.3.2.4. Métodos dos Preços Hedônicos e Custo de Viagem

O método dos preços hedônicos utiliza dados de mercado de bens que são complementares aos serviços ecossistêmicos para inferir seu valor. Este método analisa como as características ambientais influenciam os preços dos bens no mercado, especialmente imóveis. Por exemplo, propriedades próximas a parques ou corpos d'água geralmente têm valores mais altos devido aos benefícios ambientais proporcionados. A análise dos preços hedônicos envolve a coleta e análise de dados de transações de mercado, controlando por outras variáveis que afetam os preços, para isolar o valor atribuído às características ambientais. Turner, Morse-Jones e Fisher (2010) destacam a aplicação deste método para entender a influência de atributos ambientais específicos sobre os preços de mercado.

O método do custo de viagem estima o valor dos serviços ecossistêmicos baseando-se no custo de viagem que as pessoas estão dispostas a pagar para visitar um local natural. Este método é frequentemente utilizado para valorar áreas recreativas e parques naturais. Os custos considerados incluem despesas de transporte, tempo de viagem, e outras despesas relacionadas à visita. A análise do custo de viagem envolve a coleta de dados de visitantes e a modelagem da relação entre os custos de viagem e a frequência das visitas, permitindo inferir a disposição a pagar pelo acesso aos serviços ecossistêmicos. Curtis (2004) sugere que este método é eficaz para captar o valor recreativo e de uso dos serviços ecossistêmicos.

2.3.2.5. Método da Valoração Contingente e Método de Experimentos de Escolha

O método da valoração contingente (CVM) utiliza questionários para perguntar às pessoas quanto estariam dispostas a pagar por mudanças específicas na provisão de serviços ecossistêmicos. Este método é usado para valorar serviços ecossistêmicos que não têm um mercado estabelecido, como a preservação de espécies ameaçadas. Os questionários apresentam cenários hipotéticos e solicitam aos respondentes que indiquem sua disposição a pagar para manter ou melhorar os serviços ecossistêmicos. A análise dos dados coletados fornece estimativas diretas do valor econômico atribuído pelos indivíduos aos serviços

ecossistêmicos. Kumar e Kumar (2008) destacam a robustez do CVM na captura de valores econômicos para serviços ecossistêmicos não comercializados.

O método de experimentos de escolha apresenta aos entrevistados um conjunto de alternativas com diferentes níveis de serviços ecossistêmicos e preços, pedindo-lhes para escolher entre essas alternativas. Este método capta as preferências dos indivíduos e permite valorar mudanças incrementais nos serviços ecossistêmicos. Os dados são analisados usando modelos econométricos que estimam a influência dos diferentes atributos nas escolhas dos entrevistados. Este método é robusto para captar a variação nas preferências e o valor que os indivíduos atribuem a diferentes aspectos dos serviços ecossistêmicos. Felipe-Lucia, Comín e Escalera-Reyes (2015) argumentam que os experimentos de escolha são eficazes para avaliar como diferentes atributos dos serviços ecossistêmicos são valorizados pelos indivíduos.

2.4. ANÁLISES DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A avaliação da viabilidade financeira de projetos de drenagem urbana sustentável é essencial para garantir que esses projetos sejam economicamente viáveis e benéficos a longo prazo. Vários métodos analíticos podem ser empregados para essa avaliação, cada um com suas particularidades e áreas de aplicação. Abaixo, descrevemos alguns dos métodos mais comumente utilizados, como análise de custo-benefício, análise de custo-efetividade, análise de retorno sobre o investimento e análise multicritério.

2.4.1. Análise de Custo-Benefício (ACB)

A análise de custo-benefício (ACB) é uma ferramenta amplamente utilizada para avaliar a viabilidade financeira de projetos de drenagem urbana sustentável. Este método envolve a comparação dos custos totais esperados com os benefícios totais ao longo do tempo. A ACB quantifica os benefícios monetários dos serviços ecossistêmicos proporcionados pelos Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (SDUS), como a redução de custos associados a inundações urbanas, a melhoria da qualidade da água e o aumento do valor das propriedades. Métodos como a valoração contingente e a transferência de benefícios podem ser utilizados para estimar o valor monetário desses

benefícios. A ACB permite determinar se os benefícios superam os custos, indicando a viabilidade econômica do projeto (Johnson; Geisendorf, 2019).

2.4.2. Análise de Custo-Efetividade (ACE)

A análise de custo-efetividade (ACE) é outro método utilizado para avaliar a viabilidade financeira de projetos de SDUS. Diferentemente da ACB, que busca quantificar todos os benefícios em termos monetários, a ACE compara os custos de diferentes alternativas para atingir um objetivo específico, como a redução do escoamento superficial ou a melhoria da qualidade da água. Este método é particularmente útil quando os benefícios são difíceis de quantificar monetariamente. A ACE permite identificar a alternativa mais econômica para alcançar os objetivos desejados, ajudando os tomadores de decisão a selecionar as opções de SDUS que oferecem o melhor retorno para o investimento realizado (Radinja *et al.*, 2019).

2.4.3. Análise de Retorno sobre o Investimento (ROI)

A análise de retorno sobre o investimento (ROI) calcula a taxa de retorno esperada de um projeto, comparando os benefícios financeiros com os custos. Um ROI positivo indica que os benefícios esperados superam os custos, tornando o projeto economicamente viável. Este método é direto e ajuda a avaliar a lucratividade potencial dos investimentos em SDUS. A análise de sensibilidade pode ser utilizada em conjunto com o ROI para avaliar como mudanças nas premissas básicas, como custos de construção ou taxas de desconto, afetam a viabilidade financeira do projeto (Yang; Wong; Miao, 2021).

2.4.4. Análise Multicritério (AMC)

A análise multicritério (AMC) é uma abordagem que considera múltiplos critérios na avaliação da viabilidade financeira de projetos de SDUS. Este método é particularmente útil para incorporar uma ampla gama de fatores, incluindo técnicos, ambientais, sociais e econômicos. A AMC pode utilizar ferramentas como o processo de hierarquia analítica (AHP) e a lógica fuzzy para ponderar diferentes critérios e fornecer uma avaliação integrada da viabilidade do projeto. Este método permite uma análise mais abrangente e equilibrada das alternativas, considerando não apenas os custos e benefícios econômicos, mas

também aspectos qualitativos que são importantes para a sustentabilidade a longo prazo (Ellis *et al.*, 2004).

2.4.5. Análises Custos-Benefícios de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis

Em relação a viabilidade econômica dos SDUS, foram encontrados os seguintes achados na literatura.

Johnson e Geisendorf (2019) avaliaram a viabilidade financeira de SDUS aplicadas na escala de bairro considerando diversos serviços ecossistêmicos. As alternativas SDUS consideradas em seu trabalho foram: telhados verdes, fachadas verdes, drenos de árvores, valas de infiltração, sistemas de trincheiras, lagos ou reservatórios, pavimento permeável, captação de água da chuva e filtros de solo de retenção. Foram avaliados os indicadores de valor presente líquido (VPL), relação custo-benefício (RCB), eficiência de benefício¹ (EB) e eficiência de custo² (EC) para três cenários. Apenas um dos três cenários foi viável financeiramente, com um VPL de 13,5 milhões de euros, RCB de 1,33, CE de 356 €/m³ e EB de 474 €/m³.

Tabela 2.3 - Serviços ecossistêmicos analisados por Johnson e Geisendorf (2019)

Serviços Ecossistêmicos	Tipo de Benefício	Método de Valoração
Recarga de águas subterrâneas	Social	Preço de mercado
Água potável economizada	Privado	Preço de mercado
Taxa de água da chuva	Privado	Preço de mercado
Redução do escoamento	Social	Transferência de benefícios (experimentos de escolha)
Redução do escoamento	Social	Preço de mercado
Melhorias na qualidade do ar	Social	Custo de dano evitado
Armazenamento e sequestro de CO ₂	Social	Custo de dano evitado
Economia de energia	Privado	Preço de mercado
Economia de aquecimento	Privado	Custo de substituição
Resfriamento interno	Social	Custo de substituição
Externalidades do aquecimento	Social	Custo de dano evitado
Aumento da longevidade dos edifícios	Privado	Preço de mercado
Longevidade do telhado	Privado	Preço de mercado
Longevidade da fachada	Privado	Custo de substituição

¹ A eficiência de benefício representa o total do valor presente dos benefícios dividido pela redução de volume de escoamento superficial.

² A eficiência de custo representa o total do valor presente dos custos dividido pela redução de volume de escoamento superficial.

Criação de habitat	Social	Custo de substituição
Melhorias estéticas	Privado	Transferência de benefícios (preço hedônico)
Valor da propriedade (com fachadas verdes)	Privado	Transferência de benefícios (preço hedônico)
Valor da propriedade (com telhado verde)	Privado	Transferência de benefícios (preço hedônico)

Fonte: (Johnson; Geisendorf, 2019)

O trabalho de Johnson e Geisendorf (2019) foi um dos poucos que avaliaram a aplicação de SDUS em larga escala e considerando tantos benefícios de serviços ecossistêmicos. Eles argumentam que o cenário viável tem menor área de aplicação de fachadas verdes, cujos custos são elevados, não permitindo o retorno do investimento e que estudos devem ser elaborados a fim de avaliar seus impactos nas ilhas de calor.

Vincent e outros (2017) analisaram o impacto da inclusão de benefícios de serviços ecossistêmicos sobre os resultados de análise custo-benefício de grandes investimentos em SDUS. As alternativas SDUS consideradas foram reservatórios de lote (RL), telhado verde (TV) e jardim de chuva (JC). Foram considerados em dois cenários, um com telhado verde e jardim de chuva e outro cenário completo. Os arranjos de SUDS passaram por um algoritmo de otimização, considerando os custos e benefícios na rotina.

Além do benefício de redução do prejuízo anual esperado de cheias para todos os cenários, o trabalho considerou os seguintes benefícios de SE para telhados verdes: redução do custo de aquecimento e resfriamento de ambientes internos; valorização imobiliária; produção de alimentos e longevidade do telhado; redução de emissão de carbono da economia de energia; redução de emissão de carbono pela redução do volume de água no sistema unitário; custos evitados de medidas de controle de poluição do ar e valorização estética.

Já para os reservatórios de lote foram considerados os benefícios de SE: economia de água pelo aproveitamento de água de chuva; redução de taxas sanitárias; redução de emissão de carbono pela redução do volume de água no sistema unitário.

Conforme resultados apresentados na Tabela 2.4, o cenário TV+JC só foram viáveis ao considerar os benefícios de SE. Além disso, o RL mostrou ter um impacto positivo significativo nos indicadores, apontando uma ótima eficiência nos indicadores de custo-benefício.

Tabela 2.4 - Resultados da análise custo-benefício de Vincent e outros (2017)

ITEM	TV+JC COM SE	TV+JC SEM SE	TV+JC+RL COM SE	TV+JC+RL SEM SE
Benefício líquido máximo (milhões de US\$)	4.5	-	6.3	6
Razão B/C total máxima	1.25	0.85	3.3	3.5
Investimento máximo rentável (milhões de US\$)	>120	-	>120	16.3

Fonte: adaptado de Vincent *et al.* (2017).

3. METODOLOGIA

De modo geral, a primeira etapa é caracterizar as tipologias das edificações com o objetivo de delimitar as áreas intralotes elegíveis de implantação das soluções de drenagem urbana sustentáveis (SDUS). Além disso, a caracterização tem como objetivo levantar os tipos de uso a fim de estimar a demanda de aproveitamento de água de chuva.

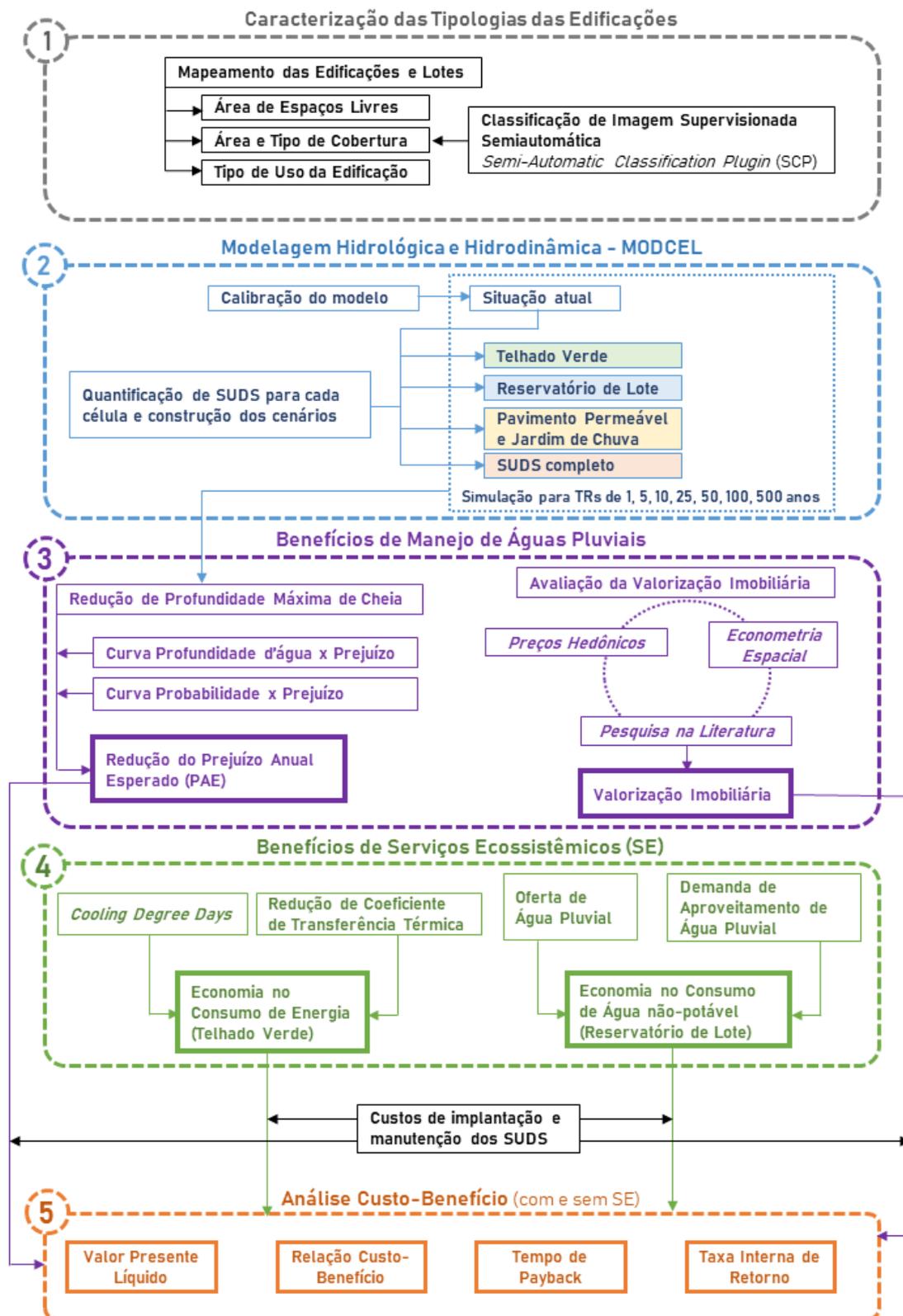
A segunda etapa consiste na modelagem hidrológica-hidrodinâmica da situação atual e dos cenários de intervenções para quantificação dos benefícios de manejo de águas pluviais. As medidas SDUS consideradas foram os telhados verdes extensivos, reservatórios de lote para amortecimento e aproveitamento de água pluvial, pavimentos permeáveis e jardins de chuvas. Com a finalidade de desenvolver a curva probabilidade versus prejuízo, foram necessárias simulações para eventos chuvosos de diversos tempos de recorrências de todos os cenários. Foram considerados cenários apenas com telhados verdes, apenas com reservatório de lote e medidas de infiltração (pavimento permeável e jardim de chuva).

A terceira etapa consiste em quantificar e monetizar os benefícios de manejo de águas pluviais, que consistem na redução do dano anual esperado com as reduções de alagamentos pelas intervenções e a valorização imobiliária originada pela redução dos alagamentos. Foram realizados diversos modelos de regressões para estimativa de impacto das inundações nos preços dos imóveis.

A quarta etapa consiste em quantificar e monetizar os benefícios de serviços ecossistêmicos. Foram considerados dois benefícios: a redução de custo de energia para refrigeração de ambientes gerada pela maior regulação térmica dos telhados verdes e a redução de custo no consumo de água gerada pelo aproveitamento da água pluvial dos reservatórios.

Quinta e última etapa consiste no cálculo de custo de implantação e manutenção e na quantificação dos indicadores da análise custo-benefício considerando o tempo de vida útil estimado das soluções. O fluxograma geral da metodologia encontra-se na Figura 3.1. As etapas serão mais detalhadas a seguir.

Figura 3.1 - Fluxograma resumido da metodologia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1. FERRAMENTAS

3.1.1. Sistema de Informação Geográfica

Por conta da importância espacial do presente trabalho, a principal ferramenta utilizada na metodologia é o Sistema de Informação Geográfica (SIG). Um sistema de informações geográficas é um sistema de computador usado para armazenar, gerenciar, analisar e exibir dados geoespaciais. Tem sido amplamente utilizado em uma variedade de campos, incluindo gestão de recursos naturais, planejamento do uso da terra, transporte, saúde, serviços públicos e planejamento urbano. Essa ferramenta permite a integração de dados de diferentes fontes, como sensoriamento remoto e GPS, para criar mapas e realizar análises espaciais. Além disso, o SIG facilita a visualização de dados na forma de mapas, o que auxilia os usuários na compreensão de padrões, relacionamentos e tendências nos dados. (Kumar *et al.*, 2023)

O *software* utilizado foi o QGIS, também conhecido como Quantum GIS, foi desenvolvido pela comunidade *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo). É amplamente reconhecido por sua acessibilidade, flexibilidade e robustez. Sua natureza de código aberto também promove a colaboração e a inovação contínua de contribuidores, como desenvolvimentos de *plugins* para diversas tarefas e extensa literatura de manuais e tutoriais, tornando-o uma escolha popular entre indivíduos, organizações e instituições acadêmicas que buscam uma solução de SIG poderosa e acessível. (Qgis Development Team, [s.d.]

Um dos *plugins* utilizados nesse trabalho é o *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP). O *plugin* fornece um conjunto de ferramentas interligadas e uma interface de usuário para facilitar e automatizar as fases da classificação da cobertura do solo, desde o download de imagens de sensoriamento remoto até o pré-processamento, processamento e pós-processamento. Os algoritmos de classificação disponíveis são: Distância Mínima, Máxima Verossimilhança, Mapeamento Angular Espectral e Floresta Aleatória. (Congedo, 2021)

Uma fonte valiosa de dados é da iniciativa OpenStreetMap (OSM). O OSM, apoiado pela OpenStreetMap Foundation ([s.d.]), é uma coleção orientada pela comunidade de portais de dados geoespaciais globais que é mantida por uma gama de usuários geoespaciais profissionais. Uma das principais vantagens dos

dados OSM é que eles são de código aberto, ou seja, são livres para qualquer pessoa usar, acessar, modificar e compartilhar, desde que preservem a atribuição de origem e a abertura. Isso permite que seus colaboradores criem conjuntos de dados grandes e complexos que seriam impossíveis de criar por pequenos grupos ou com fundos limitados. (Ehrig-Page, 2020)

Uma via de acesso aos dados é o plugin do QGIS chamado QuickOSM (Trimaille, [s.d.]). O plugin facilita o acesso e a manipulação dos dados do OSM diretamente dentro deste software GIS. Ele emprega a Overpass API para consultas rápidas e eficientes, permitindo aos usuários extrair dados geográficos específicos sem a necessidade de downloads prévios volumosos, o que otimiza significativamente os processos de trabalho. (Ehrig-Page, 2020)

3.1.2. R Studio

O R Studio é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) para a linguagem de programação R, que oferece um ambiente de trabalho completo para análise de dados, com suporte para gráficos, estatísticas e relatórios. (Rstudio Development Team, [s.d.]). A linguagem R detém diversos pacotes com funções pré-definidas para diversas tarefas. Nessa metodologia, a linguagem R foi usada na obtenção de alguns dados, tratamento e análises estatísticas.

Os dados do Instituto Fogo Cruzado foram considerados como fonte de dados para segurança. O Instituto Fogo Cruzado é uma organização que fornece dados sobre violência armada, especificamente ocorrências de tiroteios e disparos de arma de fogo, em áreas urbanas. Os dados de tiroteios do período de 2017 a 2023 foram extraídos via API, uma biblioteca em R chamada *crossfire*. (Gelape, [s.d.]) Seus dados foram considerados em detrimento às informações do Instituto de Segurança Pública (ISP) pelo fato dos dados do ISP serem agregados por área integradas de segurança pública (AISP), causando baixa variabilidade da variável de segurança, enquanto os dados de tiroteios do Instituto Fogo Cruzado contêm campos de latitude e longitude, dados de vítimas e contexto das ocorrências. (Instituto Fogo Cruzado, [s.d.]

No processo de tratamento dos dados, foram identificadas deficiências, ou até mesmo ausências, de informações geográficas. Para contornar tais problemas, foi utilizado o pacote *ggmap* que utiliza a API *geocoding* da Google para executar

a geocodificação dos endereços. O pacote *ggmap* é frequentemente utilizado para geocodificação, porém também permite a visualização e análise de dados geográficos em conjunto com os recursos gráficos do R Studio (Kahle; Wickham, 2013). Ressalta-se que o uso da API *geocoding* da Google está sujeita a cobranças, porém são disponibilizados USD 200,00 mensalmente, que correspondem a 40.000 *requests* de *geocoding*. (Google, [S.d.]

Além do tratamento de dados, utilizou-se a linguagem R para as diversas avaliações estatísticas na estimativa do impacto das cheias na valorização imobiliária. As principais bibliotecas usadas foram a *sf*, *spdep* e *spatialreg*. A biblioteca *sf* facilita a manipulação, análise e visualização de dados geográficos, com a capacidade de ler e escrever diversos arquivos de formatos geoespaciais, conversão entre sistemas de coordenadas e projeções e entre outros. A biblioteca *spdep* foi utilizada para a criação das matrizes de pesos espaciais e testes para autocorrelação espacial. A *spatialreg* foi utilizada para regressões espaciais das variáveis.

3.1.3. MODCEL – Modelo Hidrológico-Hidrodinâmico de Escoamento de Células

A urbanização é responsável por promover alterações dos escoamentos superficial e subterrâneo, com a construção de obstáculos como edificações, muros, vias, impermeabilização da superfície e com implantação de sistemas de drenagem. Tais alterações drásticas dos padrões de escoamento tornam as cheias urbanas um fenômeno complexo, usualmente necessitando de modelagem numérica (Miguez *et al.*, 2017). Tal interação do escoamento superficial com as complexas redes de macro e microdrenagem traz a necessidade de uma abordagem utilizando o conceito de *dual drainage*, simulando ambos escoamentos superficiais e da rede de drenagem simultaneamente (Djordjević; Prodanović; Maksimović, 1999)

Neste sentido, o *software* MODCEL, desenvolvido pelo Laboratório de Hidráulica Computacional da Universidade Federal do Rio de Janeiro por Miguez (2001), foi utilizado para avaliar a influências dos SDUS nas cheias urbanas. O MODCEL consiste em representar a bacia de interesse por meio de diversos tipos de células de escoamento homogêneas interligadas entre si por meio de ligações de diversos tipos e propriedades, tornando-se um modelo flexível. Assim,

MODCEL é um modelo quasi-2D, onde as células são representadas em 2D e suas ligações obedecem às equações unidimensionais, com capacidade de representar a interação entre o escoamento superficial e das redes de drenagem.

Os tipos de células disponíveis são:

- **Células de Rio ou Canal (tipo 0):** são, efetivamente, trechos de rios e de canais, cujo conjunto em sequência normalmente forma a rede de macrodrenagem, exceto pela falta dos trechos em galeria;
- **Células de Galeria (tipo 1):** são trechos de canais fechados, subterrâneos, que junto com o tipo anterior compõem a macrodrenagem;
- **Células de Planície Urbanizada (tipo 2):** para a representação de escoamentos a superfície livre através das ruas que compõem a paisagem urbana, bem como para a representação de áreas de armazenamento. Seu volume é calculado com base em três patamares: nível das ruas, nível das calçadas e praças e nível das edificações. Cada nível é especificado pelas características da urbanização: percentual da área da célula de ruas, percentual da área de calçadas e praças e o restante sendo representado pelas edificações. Normalmente as características urbanas são definidas em grupos homogêneos e especificados para cada célula;
- **Célula de Reservatório (tipo 3):** simulando o armazenamento d'água em um reservatório temporário de armazenamento;
- **Células de Planície não urbanizada (tipo 4):** para a representação de escoamentos a superfície livre em planícies não urbanizadas englobando as áreas de encosta.
- **Células de Planície com Reservatório de Lote (tipo 6):** essas células são representadas como planície urbanizadas, porém com o abatimento de vazões por reservatórios de lote com área de telhado como contribuição. São especificadas as áreas de um telhado, área superficial de um reservatório, quantidade de reservatórios, altura máxima do reservatório e área do orifício de saída. No fim é obtido o reservatório equivalente para a célula.

Cada tipo de ligação tem seus parâmetros próprios. Os principais tipos de ligações disponíveis no modelo são:

- **Planície**, para escoamento à superfície livre, resolvendo as equações de Saint-Venant sem termos de inércia, representada pela letra “P”;
- **Canal**, para escoamento à superfície livre, resolvendo as equações de Saint-Venant com termos de inércia, representada pela letra “C”;
- **Galeria**, com escoamento à superfície livre ou sob pressão, representada pela letra “G”;
- **Entrada de galeria**, com contração do escoamento, representada pela letra “E”;
- **Saída de galeria**, com expansão do escoamento, representada pela letra “S”;
- **Confluência entre duas galerias**, representada pela letra “D”;
- **Confluência entra galeria e um rio**, representada pela letra “A”;
- **Bueiro**, fazendo a interface das células superficiais com as células de galeria, representada pela letra “M1”;
- **Vertedouro de soleira espessa**, clássico, livre ou afogado, representada pela letra “V”;
- **Orifício**, também clássico, representada pela letra “O”;
- **Reservatório** (orifício + vertedouro), representada pela letra “R”;
- **FLAP**, simulando o comportamento de uma comporta tipo FLAP, representada pela letra “F”;
- **Bombeamento**, simulando o bombeamento de vazões entre duas células, representada pela letra “B”.

3.1.4. Fontes de dados

Os métodos de regressão são fundamentais para avaliar o impacto das características dos imóveis nos seus preços. Estas técnicas permitem decompor o preço de um imóvel em contribuições atribuíveis a suas características tipológicas, como quantidade de quartos, vagas de garagem, e número de banheiros; e às propriedades do ambiente, incluindo a acessibilidade a transportes, proximidade de serviços de saúde, educação e comércio.

Os métodos de regressões para avaliação dos impactos das propriedades dos imóveis em seus preços exigem um volume muito grande de dados e muitos de difícil acesso. Normalmente são consideradas propriedades tipológicas dos imóveis, como quantidade de quartos, vaga de garagem, número de banheiros

e propriedades do ambiente, como disponibilidade de meios de transporte, estabelecimentos de saúde, educação, comércio.

Dada a complexidade dessas características e a interação entre elas, a análise depende criticamente de um conjunto de dados extenso, detalhado e de qualidade. As fontes de dados, portanto, tornam-se uma ferramenta essencial para aplicação dos métodos.

Neste trabalho, por conta da ausência de dados de atributos das habitações, como quantidade de quarto, quantidade de banheiros, idade da propriedade e presença de comodidades (ex.: piscina, garagem, salão de festas), foram utilizados os dados de ambiente, que são descritos no Quadro 3.1.

O Instituto Fogo Cruzado é uma organização que fornece dados detalhados sobre violência armada em áreas urbanas do Brasil, especialmente no Rio de Janeiro e em Recife. Eles coletam e analisam informações sobre tiroteios, disparos de arma de fogo e outros incidentes relacionados à violência armada. Os dados são obtidos por meio de uma combinação de fontes, incluindo relatos de mídia, redes sociais, colaboração da comunidade e parcerias com organizações locais. Este banco de dados inclui variáveis como data, hora, coordenadas dos incidentes, número de mortos e feridos, presença de agentes de segurança, entre outros detalhes. Essas informações são cruciais para entender as dinâmicas de segurança pública e auxiliam em pesquisas, formulações de políticas públicas e iniciativas de segurança comunitária.

A base de dados de estabelecimentos do Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde (CNES) é a principal fonte de informações sobre as unidades de saúde no Brasil. Ela contém dados detalhados sobre hospitais, clínicas, laboratórios e outros tipos de estabelecimentos de saúde, incluindo localização, tipo de serviços oferecidos, capacidade de atendimento, equipamentos disponíveis e recursos humanos. Esta base é atualizada mensalmente e é utilizada tanto pelo governo para gestão e planejamento de saúde pública quanto por pesquisadores para estudos na área da saúde.

Quadro 3.1 - Fontes de dados utilizadas na metodologia.

NOME	CATEGORIA	DESCRIÇÃO	VARIÁVEIS PRINCIPAIS	FONTE
Estabelecimentos de saúde (2023)	Saúde	Informações detalhadas sobre todos os estabelecimentos de saúde no Brasil.	Localização; Tipo de Atividade; Gestão (Municipal Estadual Federal ou Privada)	Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde (CNES)
Estabelecimentos de educação básica (2023)	Educação	Informações detalhadas sobre todos os estabelecimentos de educação básica no Brasil.	Localização; Tipo de Atividade; Gestão (Municipal Estadual Federal ou Privada); Número de matrículas	Censo Escolar 2023
Shopping Centers e Supermercados	Comércio	Localização de shoppings centers e supermercados	Localização; Tipo	OSM (QuickOSM QGIS Plugin)
Praças Públicas Municipais	Lazer	Localização de praças públicas	Localização	https://www.data.rio/
Clubes e Academias	Lazer	Localização de clubes de esportes e academias	Localização; Tipo	OSM (QuickOSM QGIS Plugin)
Ocorrências de Tiroteios (2017 – 2022)	Segurança	Dados sobre violência armada em áreas urbanas, incluindo tiroteios e suas consequências.	Localização; Tipo de Incidente; Número de vítimas; Ocorrência	API - Fogo Cruzado. Instituto Fogo Cruzado
Linhas de Ônibus Municipais	Transportes	Shapefile de linha dos percursos de ônibus municipais do Rio de Janeiro	Localização	https://www.data.rio/
Pontos de Ônibus	Transportes	Shapefile de pontos de parada de ônibus da cidade do Rio de Janeiro	Localização	https://www.data.rio/
Estações de metrô	Transportes	Localização das estações de metrô	Localização	https://www.data.rio/
ITBI agregado por logradouro (2010 – 2024)	Mercado imobiliário	Valores médios de imóveis tributados por ITBI	Logradouro; Uso; Tipologia; Média dos valores dos imóveis; Média da área construída	https://www.data.rio/
Planta Genérica de Valores (2017)	Mercado imobiliário	Valores unitários padrão por tipologia e trecho de logradouro	Logradouro; Faixa de número de porta dos trechos; Vap - Valor Unitário Padrão Apartamento; Vca - Valor Unitário Padrão Casa; Vlj - Valor Unitário Padrão Loja; Vsc - Valor Unitário Padrão Sala Comercial; Vo - Valor Unitário Padrão Territorial	Lei Municipal 6250 2017 - Planta Genérica de Valores
Números de Porta	Edificações	Shapefile de pontos com o número de porta da edificação e o código associado.	Localização; Código de Logradouro e Número de Porta (CLNP); Uso; Tipo	https://www.data.rio/

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DAS TIPOLOGIAS DAS EDIFICAÇÕES

A caracterização das tipologias das edificações consiste em obter padrões construtivos e de ocupação dos lotes presentes na bacia do Canal do Mangue a fim de subsidiar na seleção das SDUS para cada lote, no levantamento do número de domicílios abaixo de telhados para consideração dos benefícios de economia de energia de ar-condicionado e definir o padrão de consumo de água não potável para calcular a demanda por reuso de água pluvial, conforme Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Parâmetros considerados na caracterização das tipologias.

PARÂMETRO	CLASSES	OBJETIVOS
Tipo de Uso	Residencial Unifamiliar Residencial Multifamiliar Não residencial	Definir padrão de consumo de água. Delimitar número de domicílios com telhado.
Tipo de Cobertura Área de cobertura	Inclinado Laje	Selecionar tipo de telhado verde Delimitar área de contribuição do reservatório de lote.
Espaços Livres (EL)	Porcentagem de EL do lote	Delimitar medidas de infiltração

Fonte: Elaborado pelo autor.

Primeiramente, foi necessário dissolver os polígonos de edificações, que representam os volumes das edificações, em um único polígono com a projeção total da edificação a fim de representar a ocupação horizontal dos lotes. Posteriormente, foi utilizada a ferramenta *análise de sobreposição* do QGIS entre os polígonos de lotes e edificações. Assim foi obtido a porcentagem de ocupação da edificação no lote.

Maior parte das edificações da bacia do Canal do Mangue tem padrão de uso misto; edifícios residenciais multifamiliares com lojas no primeiro pavimento. Por conta de ausência de dados detalhado sobre edificações de uso misto, foram consideradas condicionantes para a identificação dos usos não-residenciais. Os lotes não identificados como não-residenciais foram considerados residenciais.

Para a definição do tipo unifamiliar ou multifamiliar, foram consideradas unifamiliar as edificações com altura máxima inferior a 9 metros, sendo aproximadamente 3 pavimentos. Para obter a altura máxima para cada polígono de edificação, foi utilizada a ferramenta *unir atributos por localização (summary)*

entre as edificações dissolvidas e a camada original, conforme exemplificado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Exemplo de vista 3D dos shapefiles de edificações na região do Shopping Tijuca, em tons de cinzas, e o resultado do processo, em vermelho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o tipo de cobertura, foi utilizado o *plugin* de classificação de imagem do QGIS SCP descrito no item 3.1.1. Foi utilizado o recorte do mosaico de ortofoto datado de 2019 extraído do Sistema de Informações Urbanas (SIURB) para a BCM. Para o algoritmo, como a finalidade é apenas de delimitar os tipos de cobertura, foram coletadas apenas amostras de treino com aspectos de telhados cerâmicos, laje e outros. Para os telhados cerâmicos, foram coletadas amostra de telhados alaranjados. Para os telhados de laje, foram coletadas amostras de telhados de tons mais escuros, pois muitos edifícios da BCM têm idades avançadas, deixando os telhados de zinco com cores mais escuras por conta das intemperes. E outros foram considerando com coloração mais clara, como zinco mais recentes e lonas.

Com o arquivo *raster* da classificação, foi extraído o tipo de cobertura para cada edificação utilizando a ferramenta *Estatísticas zonais* para extrair o pixel de tipo correspondente mais frequente contido em cada polígono de edificação. Após revisões manuais de algumas coberturas de maiores relevâncias, foi obtido o tipo de cobertura para cada edificação. Um exemplo do resultado pode ser visto na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Exemplo do resultado do processo de classificação de imagem e definição de tipo de cobertura para edificações. Os telhados cerâmicos estão em cores laranjas, lajes em cores pretas e outros em cores bege e branco.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3. MODELAGEM HIDROLÓGICA-HIDRODINÂMICA – MODCEL

A modelagem hidráulica na metodologia tem como objetivo determinar as curvas de probabilidade e profundidade de cheia associadas da situação atual e dos cenários de intervenções. Neste trabalho, utilizou-se o modelo desenvolvido em trabalhos anteriores (Fraga *et al.*, 2022; Lourenço *et al.*, 2020; Martins de Sousa *et al.*, 2021; Rezende, 2018).

A modelagem hidrológica-hidrodinâmica dos cenários foi elaborada em duas etapas principais: I) definição de chuvas efetivas das células dos cenários de soluções de drenagem sustentáveis por modelo hidrológico baseado em reservatórios e II) modelagem hidrodinâmica com auxílio do *software* MODCEL utilizando as chuvas efetivas como entrada. Os procedimentos para a modelagem são descritos a seguir:

- 1) **Delimitação da bacia hidrográfica e regiões de modelagem.** A primeira etapa de modelagem é delimitar a bacia hidrográfica e definir a região de domínio da modelagem. Nessa etapa, deve-se definir o nível de detalhamento para cada região. Usualmente as células de escoamento são mais detalhadas em planícies urbanas, por conta de sua complexidade, e mais simples nas encostas, onde normalmente não há interesse em avaliar inundações e sim sua contribuição no escoamento superficial.
- 2) **Delimitação das células de escoamento e ligações.** Deve-se delimitar as células de escoamento em regiões homogêneas, respeitando o fluxo natural da água e suas ligações entre si.
- 3) **Parâmetros hidráulicos e hidrológicos.** Com as células e ligações delimitadas, devemos inserir os parâmetros hidrológicos e hidráulicos. Os parâmetros hidrológicos consistem em chuva de projeto; escoamento superficial (*runoff*) ou índice ϕ de infiltração; condições de contorno como hidrogramas de vazão de base; variação do nível da maré. Já os parâmetros hidráulicos são larguras de ligações, coeficientes hidráulicos como Manning, coeficiente de descarga de orifício e de vertedouros, entre outros.
- 4) **Calibração e Validação.** Cada modelo é uma simplificação da realidade e, inevitavelmente, incorpora um certo grau de erro. A calibração visa ajustar os parâmetros do modelo que estão sujeitos a incertezas, como os coeficientes de escoamento superficial (*runoff*) e de Manning, para minimizar o erro de representação. Este processo geralmente envolve a comparação entre os dados observados, como níveis fluviométricos ou marcas de água deixadas por cheias do evento, e as saídas simuladas pelo modelo. Quando estes dados não estão disponíveis, alternativas

como estimativas de profundidade de cheias obtidas por imagens podem ser usadas para auxiliar na calibração.

A validação, por sua vez, consiste na aplicação do modelo já calibrado a eventos diferentes daqueles usados para a calibração. A validação confirma se o modelo é robusto e confiável, atestando sua representação além do evento de calibração.

5) Chuva efetiva das células com soluções de drenagem sustentáveis.

Calcular os hietogramas de chuvas efetivas para as células com alternativas de drenagem sustentáveis pelo modelo hidrológico baseado em reservatórios.

6) Construção de cenários de intervenções e simulações. Com posse do modelo calibrado e validado, delimita-se as áreas elegíveis para as soluções de drenagem urbana sustentáveis (SDUS) e aplica as mudanças dos parâmetros de modelagem para sua representação nos modelos. Essa etapa será mais detalhada a seguir.

3.3.1. Parâmetros Hidrológicos e Hidráulicos

A seguir são descritos os principais parâmetros hidrológicos, como as chuvas de projeto, coeficientes de escoamento superficial; e hidráulicos, como o coeficiente de rugosidade de Manning, a serem inseridos na modelagem hidrodinâmica.

Com a delimitação da bacia hidrográfica, deve-se definir as chuvas de projeto e suas probabilidades associadas. A chuva de projeto é aquela que produz a condição crítica de escoamento superficial para um determinado tempo de recorrência ou tempo de retorno. O tempo de recorrência está associado com o período no qual a magnitude de um determinado evento de chuva pode ser igualada ou superada. Por definição, ele é inversamente proporcional à frequência e, portanto, detém uma probabilidade associada (Miguez; Veról; Rezende, 2016). Como a finalidade da metodologia é obter uma curva probabilidade-dano para estimativa do dano anual esperado, deve-se simular diversas chuvas de projeto com alta amplitude para melhor delimitar a curva. Neste trabalho aplicamos os tempos de 1, 5, 10, 25, 50, 100 e 500 anos.

Ao decorrer do início da precipitação, as águas pluviais viajam pela bacia até chegarem ao seu exutório, aumentando a vazão no ponto até que toda a área contribua com o escoamento superficial. Esse tempo de viagem pode variar em

função da sua declividade média, tipo de cobertura superficial, forma da bacia. Esse tempo é chamado de tempo de concentração. Para a chuva de projeto apresentar a situação mais crítica, sua duração deve ser maior ou igual ao tempo de concentração. Há diversas formulações para o tempo de concentração, conforme apresentado no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Fórmulas de tempo de concentração.

NOME	FÓRMULA
<i>California Culverts Practice</i>	$t_c = 57 \cdot \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385} \quad (3.1)$
Kirpich	$t_c = 3.989 \cdot \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (3.2)$
Dooge	$t_c = 21.88 \cdot \frac{A^{0.41}}{S^{0.17}} \quad (3.3)$
SCS – Método Cinemático	$t_c = \sum \frac{1000 \cdot L}{v} \quad (3.4)$
George Ribeiro	$t_c = \frac{16 \cdot L}{(1.05 - 0.2 \cdot p) \cdot (100 \cdot S)^{0.04}} \quad (3.5)$
Van de Chow	$t_c = 9.6 \cdot \frac{L^{0.64}}{S^{0.32}} \quad (3.6)$
Onda Cinemática	$t_c = 441 \cdot \left(\frac{n \cdot L}{i^{2/3} \cdot S^{1/2}}\right)^{0.6} \quad (3.7)$
Carter	$t_c = 5.862 \cdot \left(\frac{L}{S^{1/2}}\right)^{0.6} \quad (3.8)$
Schaake	$t_c = 4.968 \cdot \frac{L^{0.24}}{S^{0.16} \cdot A_{imp}^{0.26}} \quad (3.9)$
Desbordes	$t_c = 5.214 \cdot \frac{A^{0.3039}}{S^{0.3832} \cdot A_{imp}^{0.4523}} \quad (3.10)$

Fonte: Adaptado de Miguez; Veról; Rezende (2016) e de Silveira (2005)

Onde:

- T_c Tempo de concentração (min);
- L Comprimento do rio principal da bacia (km);
- S Declividade média da bacia (m/m);
- A Área de drenagem da bacia (km²);
- H Desnível do ponto mais elevado ao exutório (m)
- A_{imp} Fração da área impermeável da bacia (entre 0 e 1);
- P Fração da bacia com cobertura vegetal (entre 0 e 1);
- V Velocidade média do rio principal da bacia no estirão (m/s);
- n Coeficiente de rugosidade de Manning;
- i Intensidade da chuva (mm/h).

A fórmula de Kirpich e *California Culverts Practice* são matematicamente iguais, mudando apenas a forma de apresentação.

Para a definição da chuva de projeto, usa-se uma relação conhecida como IDF (intensidade x duração x frequência) e seus coeficientes são obtidos para cada posto pluviométrico, analisando seus dados medidos. A equação IDF clássica tem formato mostrado na Equação 3.11:

$$i = \frac{k \cdot TR^a}{(t_d + b)^c} \quad (3.11)$$

Onde:

i Intensidade da chuva (mm/hr);

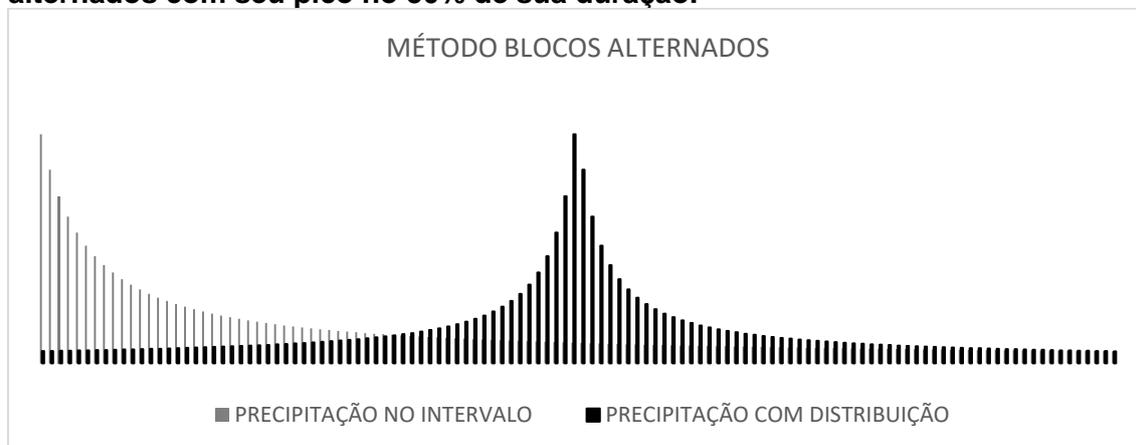
TR Tempo de recorrência (anos);

t_d Tempo de duração da chuva (min);

a, b, c, k Constantes que variam para cada posto pluviométrico.

A distribuição temporal também influencia no hidrograma de projeto. Como, a priori, a distribuição temporal não é conhecida, distribuições empíricas são comumente utilizadas para definição do hidrograma de projeto, como o método SCS, Chicago, Huff e Blocos Alternados (ou *Bureau of Reclamation*) (TUCCI, 1993). Neste trabalho, utilizou-se a distribuição de Blocos Alternados, o qual propõe a desagregação dos totais de chuva em intervalos de tempo discretizados pela sua duração total. Assim, a partir dos incrementos totais acumulados de precipitação, transformados em altura de chuva, os blocos obtidos são rearranjados numa sequência tal que, no centro da duração da chuva, situe-se o bloco maior e, em seguida, os demais blocos, em ordem decrescente, um à direita e o outro à esquerda do bloco maior, alternadamente (Tucci, 1995 *apud* Abreu *et al*, 2017), conforme Figura 3.4.

Figura 3.4 - Exemplo de chuva de projeto com distribuição conforme blocos alternados com seu pico no 50% de sua duração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a definição da chuva de projeto, deve-se inserir no modelo os parâmetros para obter a chuva efetiva, aquela que, após interceptação por vegetação, por depressões e infiltração, efetivamente geram escoamento superficial. Os coeficientes de escoamento superficiais foram obtidos por meio de estudos hidrológicos empíricos de bacias experimentais. A sua faixa usual de valores por tipo de cobertura e uso são descritas no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Faixas usuais de coeficientes de escoamento superficial.

TIPOLOGIA DA ÁREA DE DRENAGEM	C
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 2% < s < 7%	0,10 – 0,15
Solo arenoso, declividade alta > 7 %	0,15 – 0,20
Solo argiloso, declividade baixa < 2 %	0,15 – 0,20
Solo argiloso, declividade média 2% < s < 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 2% < s < 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 5% < s < 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 5% < s < 10%	0,30 – 0,36
Capoeira ou pasto com declividade > 10%	0,35 – 0,42

Fonte: adaptada de Prefeitura do Rio De Janeiro (2010).

Existem diversas formulações empíricas para o tempo de concentração obtidas a partir de medições realizadas em bacias experimentais. Logo, ao utilizar uma equação, deve-se avaliar com cautela se as condições dessas bacias experimentais são representativas para a bacia de estudo.

Referente aos parâmetros hidráulicos, o coeficiente de rugosidade de Manning é um parâmetro empírico e muito difundido pela literatura. Ele representa o atrito da água com o material de revestimento do conduto. Segundo Chow (1959), o coeficiente de Manning pode ser calculado com a Equação 3.12:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5 \quad (3.12)$$

Onde:

- n_0 Rugosidade do material da superfície do canal ou rio;
- n_1 Forma do fundo;
- n_2 Variações na seção transversal;
- n_3 Obstruções no caminho do escoamento, de forma geral;
- n_4 Vegetação;
- m_5 Grau de meandrização.

As parcelas de Manning podem ser obtidas conforme Quadro 3.5.

Quadro 3.6 – Coeficientes de Manning por fatores de influência para canais naturais.

CONDIÇÕES DO CANAL		VALORES	
Material	Terra	n_0	0.020
	Rocha		0.025
	Pedregulho fino		0.024
	Pedregulho graúdo		0.028
Grau de irregularidades da superfície	Liso	n_1	0.000
	Pequeno		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
Variação na seção transversal	Gradual	n_2	0.000
	Ocasionais		0.005
	Frequentes		0.010 – 0.015
Efeito de obstruções	Desprezível	n_3	0.000
	Pequeno		0.010 – 0.015
	Apreciável		0.020 – 0.030
	Severo		0.040 – 0.060
Vegetação	Baixa	n_4	0.005 – 0.010
	Média		0.010 – 0.025
	Alta		0.025 – 0.050
	Muito alta		0.050 – 0.100
Grau de meandrização	Pequeno	m_5	1.000
	Apreciável		1.150
	Severo		1.300

Fonte: adaptado de Chow (1959).

Outros valores típicos de coeficiente de Manning, como para canais artificiais, encontram-se no Quadro 3.7.

Quadro 3.8 - Coeficientes de Manning para canais e cursos d'água naturais.

CONDIÇÕES	MÍNIMO	MÁXIMO	USUAL
CANAIS REVESTIDOS			
Concreto	0,013	0,016	0,015
Gabião manta	0,022	0,027	0,027
Gabião caixa	0,026	0,029	0,029
VSL	0,015	0,017	0,017
Rip-rap	0,035	0,040	0,040
Pedra argamassada	0,025	0,040	0,028
CANAIS ESCAVADOS NÃO REVESTIDOS			
Terra, limpo, fundo regular	0,028	0,033	0,030
Terra com capim nos taludes	0,035	0,060	0,045
Sem manutenção	0,050	0,140	0,070
CURSOS D'ÁGUA NATURAIS			
Seção regular	0,030	0,070	0,045
Fundo de cascalho, seixos e poucos matacões	0,040	0,050	0,040
Fundo de seixos com matacões	0,050	0,070	0,050
Seção irregular com poços	0,040	0,100	0,070

Fonte: (Prefeitura do Rio de Janeiro, 2010).

3.3.2. Modelo hidrológico baseado em reservatórios

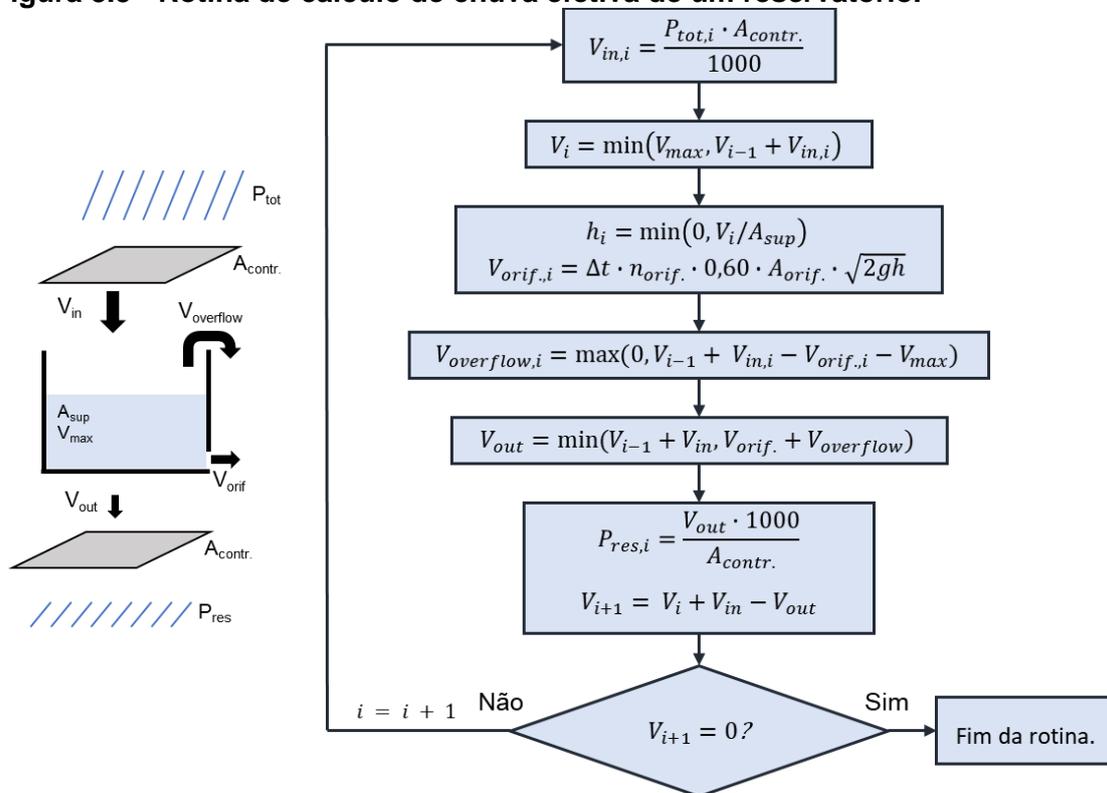
Com objetivo ter maior controle sobre a rotina de transformação chuva-vazão e trabalhar como arranjos diferentes das alternativas sustentáveis, foi elaborado um modelo hidrológico simplificado baseado em reservatórios a fim de obter chuvas efetivas para cada célula de escoamento para serem inseridas como entrada no modelo hidrodinâmico. O modelo foi inspirado no método aplicado pelo software *Storm Water Management Model (SWMM)* (Huber *et al.*, 2004; Rossman, 2016).

Cada alternativa de drenagem sustentável foi simulada como uma unidade de armazenamento, contendo ou não um orifício de fundo. A rotina de simulação de um reservatório está presente no fluxograma da Figura 3.5. As etapas são as seguintes: 1) calcula-se o volume de entrada (V_{in}) com base na precipitação total (P_{tot}) e área de contribuição ($A_{contr.}$) da alternativa, que é a área de telhado para telhados verdes (TV) e reservatórios de lote (RL) e a própria área superficial para jardim de chuva (JC) e pavimento permeável (PP); 2) calcula-se o volume do passo de tempo atual (V_i), sendo limitado ao volume de capacidade da alternativa (V_{max}); 3) calcula-se o volume de saída pelos orifícios (V_{orif}); 4) o volume de extravasamento ($V_{overflow}$) é calculado pelo volume excedente em

relação ao volume máximo após descontado o volume do orifício; 5) a precipitação efetiva do reservatório é calculada com base da área de contribuição e calcula-se o volume final da rotina; 6) Repete a rotina até o reservatório se esvaziar.

Após a rotina do reservatório, a precipitação efetiva do reservatório e a precipitação efetiva do restante da área da célula (calculada pelo coeficiente de escoamento) são somadas para cada passo de tempo considerando a porcentagem de suas áreas em relação à área total da célula como peso. A precipitação efetiva calculada então é limitada à precipitação efetiva da célula da situação atual.

Figura 3.5 - Rotina de cálculo de chuva efetiva de um reservatório.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.3. Construção de cenários de modelagem

Foram considerados simulações das condições atual e de implantação das alternativas de SDUS distribuídas na escala da bacia hidrográfica. Foram desenvolvidos cenários individuais com a finalidade de comparar os resultados de análise custo-benefício entre as alternativas e a combinação entre elas para avaliar possíveis co-benefícios associados.

Os cenários de modelagem e suas respectivas siglas considerados neste trabalho encontram-se descritos a seguir.

3.3.3.1. Situação Atual (SA)

A situação atual representa o estado atual da bacia hidrográfica e tem como objetivo servir de *baseline* para comparação com os estados de intervenções, construir a curva probabilidade-prejuízo e levantar as variáveis independentes relacionadas a alagamentos para a avaliação da valorização imobiliária.

3.3.3.2. Telhados Verdes (TV)

O cenário de intervenção com telhados verdes tem como objetivo avaliar as reduções de profundidade de cheias na bacia hidrográfica pelo *retrofitting* de telhados verdes extensivos em coberturas do tipo laje distribuídas pela bacia. Adotou-se como áreas elegíveis de *retrofitting* de telhado verde as coberturas do tipo laje com a premissa de que os telhados cerâmicos não seriam capazes de receber a sobrecarga de um telhado verde em condição de saturação.

Para cada célula de escoamento foi executada a rotina de modelo hidrológico apresentada no item 3.3.2. Foram calculadas as quantidades de edificações elegíveis para aplicação de TV e área total de telhado do tipo laje de cada célula. Assim, foi construído um reservatório único equivalente para cada célula de escoamento, o qual sua quantidade de orifícios é igual à quantidade de edificações e sua área de contribuição e área superficial igual à área total de telhado de laje. Foi considerado um orifício de saída de fundo de 10 mm de diâmetro para cada edificação.

A capacidade do telhado verde depende do modelo a ser adotado. ZinCo ([s.d.]) apud Wilkinson e Feitosa (2016) exemplificam alguns tipos de telhados verdes em função de sua inclinação e sua capacidade de retenção de água conforme Quadro 3.9.

Quadro 3.9 – Valores de referências de capacidade de retenção de telhados verdes em função da inclinação do telhado.

Faixa de inclinação do telhado	Capacidade de retenção (L/m ²)	Tipo
0° - 10°	80 - 135	Intensivo
10° - 15°	38	Extensivo
15° - 25°	40	Extensivo
20° - 25°	44	Extensivo
25° - 35°	64	Extensivo

Fonte: Adaptado de ZinCo ([s.d.]) e Wilkinson e Feitosa (2016).

3.3.3.3. Reservatório de Lote (RL)

O cenário de intervenção com reservatórios de lote para aproveitamento de águas pluviais e regularização de vazão tem como objetivo avaliar as reduções de profundidades de cheias na bacia hidrográfica e sua disponibilidade de água pluvial para consumo não-potável.

Todos os telhados foram elegíveis para receber os reservatórios de lote. Não houve restrições de espaços livres no lote, considerando que o reservatório pode ser instalado no interior da edificação. Os reservatórios foram dimensionados conforme equação da Lei Estadual 9.164 de 28 de dezembro de 2020 utilizando a altura pluviométrica do Decreto Municipal 23.940 de 30 de Janeiro de 2004, resultando na Equação 3.13.

$$V = K \cdot A \cdot h \quad (3.13)$$

Onde:

- V volume do reservatório, em litros;
- K coeficiente de escoamento superficial, igual a 0,85 para telhados;
- A área de telhado, em m²;
- h altura pluviométrica, em metros, igual a 0,06 conforme decreto municipal.

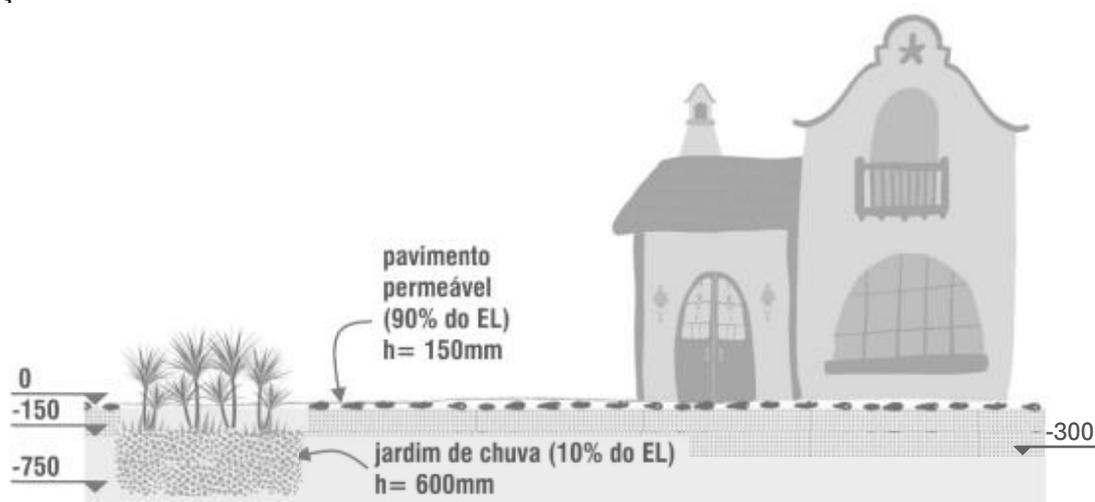
Para cada célula de escoamento foi executada a rotina de modelo hidrológico apresentada no item 3.3.2. Foram calculadas as quantidades de edificações, área total de telhado e o volume total de reservatórios de cada célula. Assim, foi construído um reservatório único equivalente para cada célula de escoamento, o qual sua quantidade de orifícios é igual à quantidade de edificações, sua área de contribuição à área total de telhado e sua área superficial ao volume total dividido pela altura padrão de 2 metros. Foi considerado um orifício de saída de fundo de 25 mm de diâmetro para cada edificação.

3.3.3.4. Infiltração (IF)

O cenário de medidas de infiltração com o uso de pavimentos permeáveis e jardins de chuva tem o objetivo de avaliar as reduções de profundidade de cheias na bacia hidrográfica. Apesar de haver serviços ecossistêmicos gerados pelas medidas de infiltração, como melhoria da qualidade da água, do ar e aprimoramento estético, só serão considerados os benefícios do manejo de águas pluviais para o cenário.

Para cada célula de escoamento foi executada a rotina de modelo hidrológico apresentada no item 3.3.2. Para cada célula foi calculada sua área total de espaços livres. Assim, foi construído um reservatório equivalente para os jardins de chuva e pavimentos permeáveis, considerando sua área de contribuição e superficial iguais a 10% e 90% da área total de espaços livres, respectivamente. Não foram aplicados orifícios de saída para as alternativas. A sua capacidade de retenção por metro quadrado foi calculada com base no valor típico de porosidade de camadas drenante de 30% (Ballard *et al.*, 2015).

Figura 3.6 – Corte esquemático do pavimento permeável e jardim de chuva nos espaços livres dos lotes.



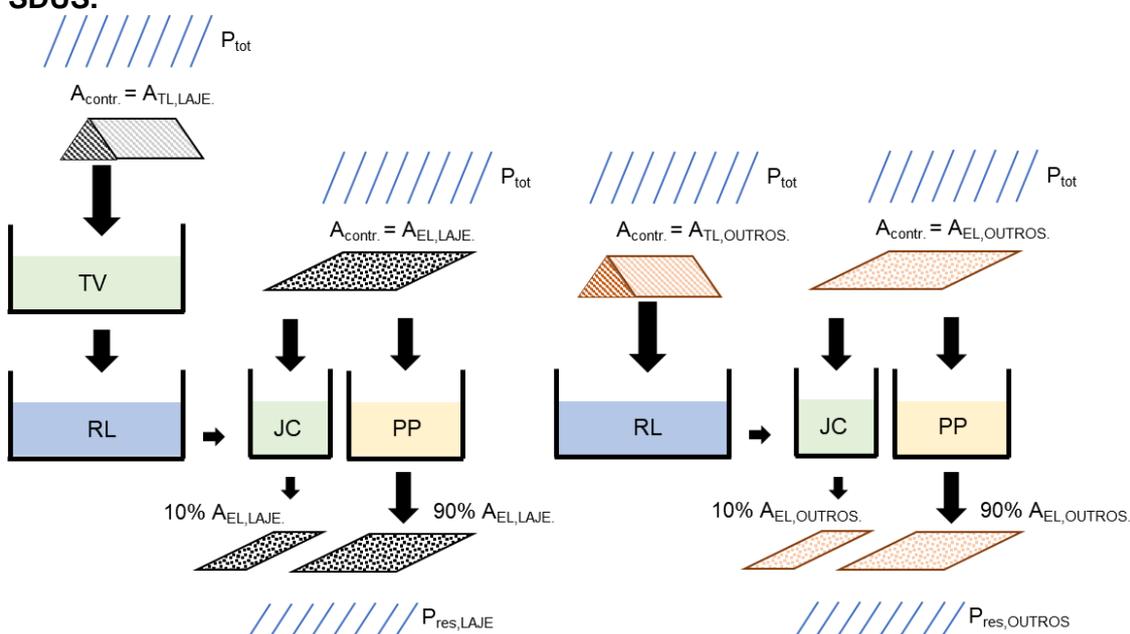
Fonte: Adaptado de Okumura (2022).

3.3.3.5. Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis (SDUS)

O cenário de sistemas de drenagem urbana sustentáveis consiste na consideração de todas as alternativas anteriores. Porém, de maneira distinta das demais, este cenário considerou as soluções como reservatórios em cascata, ou em série.

Foram obtidas as precipitações efetivas para os lotes de telhados do tipo laje e dos demais tipos de telhado separadamente. Para os lotes do tipo laje, a precipitação efetiva obtida pelos telhados verdes foi considerada como chuva de entrada para os reservatórios de lote. Em seguida, a precipitação efetiva dos reservatórios de lote foi somada à precipitação direta sobre o jardim de chuva, considerando os volumes oriundos do reservatório e da própria chuva. Já para os demais lotes, não foram considerados os telhados verdes, conforme Figura 3.7.

Figura 3.7 - Esquema de reservatórios em cascata considerados no cenário de SDUS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a definição da precipitação efetiva de cada tipologia, as precipitações efetivas e precipitação efetiva do restante da área da célula (calculada pelo coeficiente de escoamento) são somadas para cada passo de tempo considerando a porcentagem de suas áreas dos respectivos lotes em relação à área total da célula como peso. A precipitação efetiva calculada então é limitada à precipitação efetiva da célula da situação atual.

3.4. BENEFÍCIOS DO MANEJO DAS ÁGUAS PLUVIAIS

A seguir são descritos os procedimentos metodológicos para obtenção da redução de prejuízo anual esperado e da valorização imobiliária de imóveis oriundos do melhor manejo das águas pluviais.

3.4.1. Redução de Prejuízo Anual Esperado

A presente metodologia foi baseada em Nagem (2008), cujo trabalho objetivou valorar os prejuízos causados por doenças de veiculação hídrica, prejuízos à propriedade (conteúdo e edificação), limpeza de residências, deseconomias ao sistema de transporte e danos materiais a veículos. Neste trabalho, foram considerados apenas os prejuízos à propriedade (conteúdo e edificação).

Os danos de inundações estão associados à sua magnitude e sua probabilidade de ocorrência. Primeiramente, define-se as curvas dano *versus* profundidade para os danos associados à edificação e ao conteúdo. O Quadro 3.1 mostra a premissa adotada como base para as considerações dos prejuízos.

Quadro 3.10 – Profundidade de inundação e descrição de prejuízos associados.

Altura de Inundação (m)	Prejuízos
$0,00 \leq h < 0,15$	Nesta faixa, a água fica restrita às ruas, portanto, só afeta a passagem de veículos nas vias, pois com o acúmulo das águas há uma tendência natural de redução da velocidade por questões de segurança.
$0,15 \leq h < 0,30$	A inundação ultrapassa o meio fio e afeta a rotina dos transeuntes. Será a partir da altura de submersão de 15 cm que se considerará a população sujeita a doenças de veiculação hídrica. A situação do tráfego só tende a piorar.
$0,30 \leq h < 0,50$	É nesta faixa que inicia os danos materiais aos veículos.
$0,50 \leq h < 0,75$	Com 50 cm de inundação as propriedades são afetadas, causando danos à estrutura e ao conteúdo. Nesta faixa o fluxo de veículos é completamente paralisado.
$0,5 \leq h < 1,00$	Os danos têm um crescimento significativo a partir desta faixa de inundação.
$h \leq 1,00$	Os veículos estão submersos e praticamente todos os itens do interior das propriedades foram atingidos. Os transtornos beiram o caos.

Fonte: (Nagem, 2008)

Os prejuízos das edificações dependem de seu padrão de acabamento e tipologia. Nagem (2008) baseou-se nos danos estimados através de um imóvel padrão, residencial unifamiliar de um pavimento, conforme apresentado por Salgado (1995). Os acabamentos seguem a Norma Técnica NBR 12721-2006, que estabelece critérios para o cálculo de custos unitários básicos de construção (CUB). O CUB é divulgado mensalmente pelos Sindicatos da Indústria da Construção Civil para os diferentes projetos-padrão. A definição dos padrões para as localidades de estudo deve ser correlacionada à renda média familiar da área, pelas informações dos setores censitários do IBGE, e suas respectivas

classes socioeconômicas, estipulado pelo Critério de Classificação Econômica do Brasil (ABEP, 2022).

Quadro 3.11 - Características principais dos projetos-padrão de residência unifamiliar considerados por classe econômica.

Classe	Renda Média Familiar Pontuação	Padrão Residencia I	Código Área Real (m ²)	Descrição
A	R\$ 21.826,75 45-100	Residência Padrão Alto	R1-A 224,82	Residência composta de quatro dormitórios, sendo um suíte com banheiro e closet, outro com banheiro, banheiro social, sala de estar, sala de jantar e sala íntima, circulação, cozinha área de serviço completa e varanda (abrigo para automóvel).
B1	R\$ 10.361,48 38 - 44	Residência Padrão Normal	R1-N 106,44	Residência composta de três dormitórios, sendo um suíte com banheiro, banheiro social, sala, circulação, cozinha, área de serviço com banheiro e varanda (abrigo para automóvel).
B2	R\$ 5.755,23 29 - 37			
C1	R\$ 3.276,76 23 – 28	Residência Padrão Baixa	R1-B 58,64	Residência composta de dois dormitórios, sala, banheiro, cozinha e área para tanque.
C2	R\$ 1.965,87 17 - 22			
DE	R\$ 900,60 0 -16	Residência Popular	RP1Q 39,56	Residência composta de dois dormitórios, sala, banheiro e cozinha.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ABNT (2006) e ABEP (2022).

O custo dos danos às edificações é calculado pela Equação 3.3

$$CE = (0,5 \cdot CUB \cdot ED) \cdot ACI \quad (3.3)$$

Onde:

- CE* Custos dos danos às edificações, em R\$;
- CUB* Custo unitário básico de construção, em R\$/m²;
- ED* Porcentagem da edificação danificada;
- ACI* Área construída inundada, em m²;

A área construída inundada depende da taxa de ocupação média das edificações e deve ser definida pelo avaliador. Já a porcentagem da edificação danificada depende da altura de inundaçã, cujos valores estão no Quadro 3.3.

Quadro 3.12 – Percentagem da edificação danificada em função da altura de inundação.

Código	Classes	Alturas de inundação (m)					
		0,50 a 0,75	0,75 a 1,00	1,00 a 1,50	1,50 a 2,00	2,00 a 2,50	2,50 a 3,00
R1-A	A	0,095	0,164	0,170	0,196	0,210	0,216
R1-N	B1, B2	0,056	0,130	0,137	0,167	0,183	0,198
R1-B	C1, C2	0,042	0,133	0,137	0,164	0,173	0,185
RP1Q	D e E	0,040	0,142	0,147	0,174	0,183	0,197

Fonte: (SALGADO, 1995)

O valor e quantidade de conteúdo dependem do poder aquisitivo de cada família. Salgado (1995) definiu os itens de uma residência padrão normal para a classe média (B1 ou B2) conforme Quadro 3.4. Então, os itens devem ser orçados à vista, considerando os preços mais baixos encontrados no mercado e depreciados em 50% por conta do uso a fim de desenvolver uma estimativa mais conservadora. Para estimar o prejuízo ao conteúdo de outras classes econômicas, aplica-se um fator multiplicador baseado na pontuação do ABEP (2022), conforme Quadro 3.2.

Quadro 3.13 – Lista de conteúdo para residência padrão normal e a faixa de inundação associada ao prejuízo.

Cômodo	Item	Faixas de Inundação (m)
Sala de Estar	Sofá de 2 lugares	0,50 a 0,75
	Sofá de 3 lugares	0,50 a 0,75
	Mesa de centro	0,50 a 0,75
	Estante	0,50 a 0,75
	Armário baixo (rack)	0,50 a 0,75
	Ar condicionado	0,75 a 1,00
	Ventilador	1,00 a 1,50
	Televisão 29"	1,00 a 1,50
	DVD	1,00 a 1,50
	Micro system	1,00 a 1,50
	Micro computador	1,00 a 1,50
	Rack do computador	0,50 a 0,75
	Mesinha	0,50 a 0,75
	Telefone	1,00 a 1,50
Luminária de mesa	1,00 a 1,50	
Sala de Jantar	Conjunto de mesa e 6 cadeiras	0,50 a 0,75
	Armário baixo (buffet)	0,50 a 0,75
Quarto de Casal	Cama de casal	0,50 a 0,75
	Colchão de casal	0,75 a 1,00
	Armário duplex	0,50 a 0,75
	TV 20"	1,00 a 1,50
	Cômoda	0,50 a 0,75
	Telefone	0,50 a 0,75

Cômodo	Item	Faixas de Inundação (m)
	Mesa de cabeceira (2 unid)	0,50 a 0,75
	Luminária de mesa	1,00 a 1,50
	Rádio relógio	1,00 a 1,50
Quarto de Solteiro	Cama de solteiro	0,50 a 0,75
	Colchão de solteiro	0,75 a 1,00
	Armário duplex	0,50 a 0,75
	Cômoda	0,50 a 0,75
	Mesa de cabeceira	0,50 a 0,75
	Luminária de mesa	1,00 a 1,50
	Rádio relógio	1,00 a 1,50
	Mesa de estudo	0,50 a 0,75
	Cadeira	0,50 a 0,75
	Ventilador	1,00 a 1,50
Cozinha	Armário de cozinha balcão	0,50 a 0,75
	Armário de cozinha paineleiro	0,50 a 0,75
	Armário de cozinha parede	2,00 a 3,50
	Conjunto de mesa e 4 cadeiras	0,50 a 0,75
	Fogão	1,00 a 1,50
	Depurador	2,00 a 3,50
	Forno elétrico	1,00 a 1,50
	Micro-ondas	1,00 a 1,50
	Geladeira	0,50 a 0,75
	Freezer	0,50 a 0,75
	Torradeira	1,00 a 1,50
	Liquidificador	1,00 a 1,50
	Batedeira	1,00 a 1,50
	Lavadora de louças	0,50 a 0,75
Cafeteira	1,00 a 1,50	
Área de Serviço	Lavadora de roupas	0,50 a 0,75
	Área de Serviço Ferro de passar roupas	1,50 a 2,00
	Aspirador de pó	1,50 a 2,00

Fonte: (Salgado, 1995)

Os prejuízos de conteúdo são calculados seguindo a Equação 3.4.

$$CC = \left(\frac{0,50 \cdot CCP}{AIP} \cdot F_m \right) \cdot AIC \quad (3.4)$$

Onde:

CC Custos dos danos ao conteúdo, em R\$;

CCP Custo do conteúdo do Imóvel Padrão, em R\$;

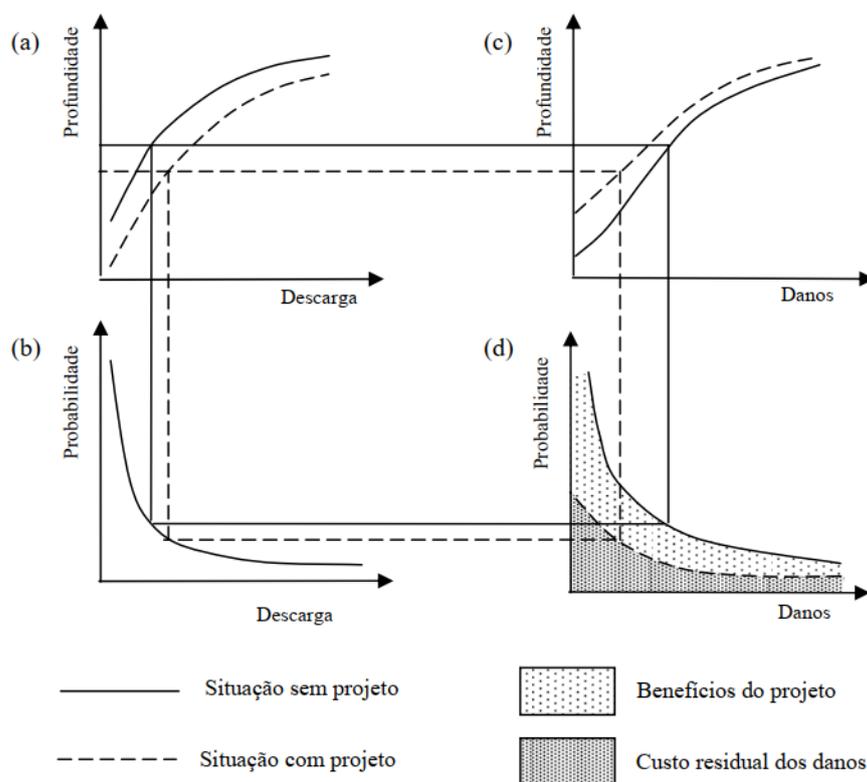
AIP Área do Imóvel Padrão, em m²;

F_m Fator multiplicador;

ACI Área construída inundada, em m²

O prejuízo anual esperado (PAE) é o parâmetro normalmente usado para apoiar processos de tomada de decisão sobre gerenciamento de risco de inundação (OUBENNACEUR *et al.*, 2019). Conforme Figura 3.8, primeiramente deve-se obter as descargas e suas probabilidades associadas pela hidrologia. Posteriormente, obtém-se a relação das descargas com as profundidades pelas condições hidráulicas da área de estudo. Tais parâmetros são feitos pela modelagem hidrológica-hidrodinâmica, onde a probabilidade é associada ao tempo de retorno. Como definido anteriormente, as profundidades, por sua vez, determinam os danos causados, que dependerão da tipologia das edificações. Assim, os danos foram calculados para os tempos de retorno de 1, 5, 10, 25, 50, 100 e 500 anos, e o PAE definido como a integração da curva de custo de dano de probabilidade de exceção, foi calculado pela regra trapezoidal. Em seguida, a redução do PAE foi calculada com a diferença da integração entre as curvas de dano de probabilidade atual e dos cenários de intervenção.

Figura 3.8 - Método de obtenção do prejuízo anual esperado.



Fonte: (Nagem, 2008).

3.4.2. Valorização Imobiliária pela Redução das Cheias Urbanas

A avaliação dos impactos dos riscos de cheias, ou inundações, sobre os preços dos imóveis é uma questão crítica na interseção da economia ambiental e do planejamento urbano. O objetivo dessa análise é compreender como as ameaças naturais afetam o mercado imobiliário, influenciando tanto a avaliação dos imóveis quanto as decisões de compra e venda. Neste contexto, várias metodologias são empregadas para quantificar esses efeitos, cada uma baseada em premissas específicas que orientam a interpretação dos dados coletados.

Uma das abordagens mais comuns é o Método dos Preços Hedônicos, que permite estimar o valor implícito de características específicas dos imóveis, como sua susceptibilidade a inundações, ao observar como esses fatores influenciam os preços de mercado (Ismail; Abd Karim; Basri, 2020). Este método desagrega o preço do imóvel em componentes que refletem não apenas as características físicas da propriedade, mas também a qualidade do ambiente e os riscos associados (Freeman III; Herriges; Kling, 2014).

Outra abordagem relevante é o uso de Modelos de Econometria Espacial, que analisam como a proximidade a áreas propensas a cheias pode impactar os preços dos imóveis nas adjacências (Anselin, 1988).

Adicionalmente, o Método Diferença em Diferença é utilizado para isolar o efeito causal de eventos de inundação sobre o valor dos imóveis. Por meio da comparação entre as mudanças nos preços de imóveis em áreas afetadas e não afetadas antes e depois de uma inundação, este método permite avaliar os impactos diretos das cheias.(Bui; Wen; Sharp, 2022)

Além das regressões, as técnicas de Machine Learning têm sido cada vez mais aplicadas neste campo para capturar complexidades e padrões nos dados que métodos tradicionais podem não identificar eficientemente. Redes Neurais Artificiais, por exemplo, podem modelar relações não-lineares complexas entre uma vasta gama de variáveis e os preços dos imóveis. Algoritmos como Árvores de Decisão e Florestas Aleatórias são utilizados para analisar a importância relativa de diferentes características, incluindo riscos de cheias, na determinação dos preços dos imóveis. Essas técnicas são particularmente úteis em áreas onde os padrões de risco de inundação são complexos ou onde grandes volumes de dados estão disponíveis.

No âmbito deste trabalho, serão descritos os métodos dos preços hedônicos e os modelos da econometria espacial.

3.4.2.1. Definição das variáveis

Por conta da ausência de fontes de dados para os atributos das habitações, este trabalho considerou as características do ambiente, como disponibilidade de serviços de saúde, educação, comércio, lazer e acessibilidade de meios de transportes. Todavia, se disponíveis, deve-se incluir variáveis de atributos das habitações, como quantidade de quarto, quantidade de banheiros, idade da propriedade e presença de comodidades (ex.: piscina, garagem, salão de festas). As variáveis estudadas nesse trabalho encontram-se no Quadro 3.14.

Quadro 3.15 – Variáveis consideradas para avaliação do impacto das cheias nos preços dos imóveis.

Variável	Descrição
PGV	Valor Unitário Padrão (R\$/m ²)
RENDA_MED	Renda mensal média do setor censitário pertencente. (R\$)
num_pavime	Número de pavimentos

TRANS_METR	Qnt. de estações de metrô dentro do raio de 800 m
DIST_METRO	Distância da estação de metrô mais próxima (m)
TRANS_ONIB	Qnt. de linhas de ônibus municipais dentro do raio de 250 m
EDUC_PUBLI	Qnt. de estabelecimentos de educação pública dentro do raio de abrangência
EDUC_PRIVA	Qnt. de estabelecimentos de educação privada dentro do raio de abrangência
SAUD_PUBLI	Qnt. de estabelecimentos de saúde pública dentro do raio de abrangência
SAUD_PRIVA	Qnt. de estabelecimentos de saúde privada dentro do raio de abrangência
SEG_FOGOOCR	Qnt. de ocorrências de tiroteio no raio de 1000 m
COMERCIO	Qnt. de comércio dentro do raio de abrangência
LAZER	Qnt. de equipamentos de lazer dentro do raio de abrangência
HID_PC	Distância até o ponto crítico de drenagem mais próximo (m)
HID_NA_05	Resultado de altura máx. de cheia da situação atual da modelagem para TR=5 anos (m)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para obter as variáveis quantitativas, quantidade de estabelecimentos dentro de um certo raio de abrangência, foram adotados os raios presentes no Quadro 3.16. Os raios de abrangência foram adotados considerando o tempo de caminhada de 5 (400 metros), 10 (800 metros) e 20 minutos (1600 m). Adotou-se a premissa que quanto menor a oferta ou maior capacidade do estabelecimento, maior é a propensão de percorrer maiores distâncias da população.

Quadro 3.16 – Tabela com raios de influência para cada tipo de atividade dos estabelecimentos de saúde, educação e lazer.

	DESCRIÇÃO	RAIO (m)
ESTABELECEMENTOS DE SAÚDE	Unidade de apoio diagnose e terapia (sadt isolado)	0
	Servico de atencao domiciliar isolado (home care)	0
	Central de abastecimento	0
	Unidade movel de nivel pre-hospitalar na area de urgencia	0
	Centro de atencao hemoterapia e ou hematologica	0
	Unidade movel terrestre	0
	Central de notificacao, captacao e distrib de orgaos estadual	0
	Central de gestao em saude	0
	Central de regulacao do acesso	0
	Telessaude	0
	Polo academia da saude	0
	Central de regulacao medica das urgencias	0
	Oficina ortopedica	0
	Polo de prevencao de doencas e agravos e promocao da saude	0
	Farmacia	250

	DESCRIÇÃO	RAIO (m)
	Consultorio isolado	400
	Centro de saude/unidade basica	400
	Laboratorio de saude publica	400
	Centro de imunizacao	400
	Unidade de vigilancia em saude	400
	Centro de atencao psicossocial	400
	Pronto socorro especializado	400
	Pronto atendimento	400
	Pronto socorro geral	400
	Clinica/centro de especialidade	800
	Policlinica	800
	Hospital geral	1600
	Hospital/dia - isolado	1600
	Hospital especializado	1600
ESTABELECIMENTOS DE EDUCAÇÃO BÁSICA	Ensino Fundamental	400
	Educação Infantil, Ensino Fundamental	400
	Educação Infantil	400
	Ensino Fundamental, Educação de Jovens Adultos	400
	Educação de Jovens Adultos	400
	Educação Infantil, Ensino Fundamental, Educação de Jovens Adultos	400
	Educação Profissional	400
	Educação Infantil, Ensino Fundamental, Ensino Médio	800
	Ensino Médio, Educação Profissional, Educação de Jovens Adultos	800
	Ensino Médio, Educação de Jovens Adultos	800
	Ensino Médio	800
	Ensino Fundamental, Ensino Médio, Educação Profissional	800
	Ensino Fundamental, Ensino Médio, Educação de Jovens Adultos	800
	Ensino Médio, Educação Profissional	800
	Ensino Fundamental, Ensino Médio	800
	Educação Infantil, Ensino Fundamental, Ensino Médio, Educação Profissional, Educação de Jovens Adultos	800
Ensino Fundamental, Ensino Médio, Educação Profissional, Educação de Jovens Adultos	800	
LAZER	Academia	200
	Centros esportivos	800
	Praças	800
	Estádios	800

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base em dados de questionários e dados de GPS, Millward; Spinney; Scott (2013) exploraram o comportamento de caminhada em Halifax, Canadá. O trabalho identificou que a distância média das caminhadas é de 670 metros e de

duração média de 9 minutos, sendo que as distâncias das viagens mais frequentes variam de 400 a 1120 metros, estando condizente com os raios estipulados.

Quadro 3.17 - Valores de duração e distância médias de caminhada por propósito de viagem.

Propósito da viagem	Duração média da caminhada (min)	Distância média da caminhada (km)
Durante o trabalho	10.4	0.83
Para ou do trabalho	10.8	0.84
Para trabalho doméstico	7.8	0.62
Para cuidado infantil	8.0	0.59
Para cuidado de adultos	10.9	0.94
Para bens e serviços	8.5	0.62
Para refeições em restaurantes	7.8	0.55
Para outras atividades pessoais	8.2	0.62
Para educação	13.2	0.77
Para atividades cívicas e voluntárias	6.3	0.46
Para serviços religiosos	4.9	1.12
Para assistência de transporte	5.4	0.45
Para esportes e entretenimento	11.1	0.92
Para socialização em casa	6.9	0.53
Para outras socializações	9.8	0.74
Para lazer fisicamente ativo	9.8	0.69
Para coaching	16.0	1.03
Para artesanato e hobbies	24.5	1.88
Para entretenimento ou outro lazer ativo	5.3	0.4
Para mídia ou comunicação	5.3	0.4
Total	9.0	0.67

Fonte: adaptado de Millward, Spinney e Scott (2013).

3.4.2.2. Método dos Preços Hedônicos

O Método dos Preços Hedônicos é uma abordagem econômica utilizada para estimar o valor de características específicas de bens ou serviços, partindo do princípio de que o preço de um bem é a soma dos valores de suas características distintas. No contexto de inundações e seus impactos sobre os preços dos imóveis, este método permite isolar e quantificar o efeito de variáveis relacionadas a inundações, como proximidade a corpos d'água, histórico de

inundações e medidas de prevenção, sobre os valores dos imóveis. Sua fórmula básica segue a Equação 3.14.

$$y = \beta X + \varepsilon \quad (3.14)$$

Onde:

- y Vetor da variável dependente (valor dos imóveis);
- β Vetor de coeficientes das variáveis independentes;
- X Matriz das variáveis independentes (características dos imóveis);
- ε Resíduos (termo de erro).

O método dos preços hedônicos consiste em se aplicar uma regressão linear múltipla utilizando o método de aproximação dos mínimos quadrados ordinário (MQO), minimizando a soma dos quadrados dos resíduos. Para garantir a validade dos resultados e a interpretação correta dos coeficientes, a regressão linear múltipla tem que atender aos seguintes principais pressupostos:

- **Linearidade.** A relação entre a variável dependente e independentes devem ser lineares;
- **Independência e normalidade dos resíduos.** Os resíduos devem ser independentes entre si, não devendo ter correlação entre si. Além disso, os resíduos devem seguir uma distribuição normal, fator fundamental para construção dos intervalos de confiança e testes de hipótese. Testes estatísticos, como o teste de Durbin-Watson, podem ser usados para detectar a presença de autocorrelação nos resíduos. Já para avaliar a normalidade dos erros, pode ser feita uma análise gráfica de um Gráfico Q-Q (Quantil-Quantil);
- **Homoscedasticidade.** A variância dos erros deve ser constante para todos os valores das variáveis independentes. Para detectar a heterocedasticidade, podem ser utilizados testes estatísticos, como o teste de White ou o teste de Breusch-Pagan;
- **Multicolinearidade.** As variáveis independentes não devem ser altamente correlacionadas entre si, podendo dificultar a estimação precisa dos coeficientes. Podem ser utilizados testes estatísticos, como o fator de inflação da variância (VIF), para verificar a presença e a gravidade da multicolinearidade;

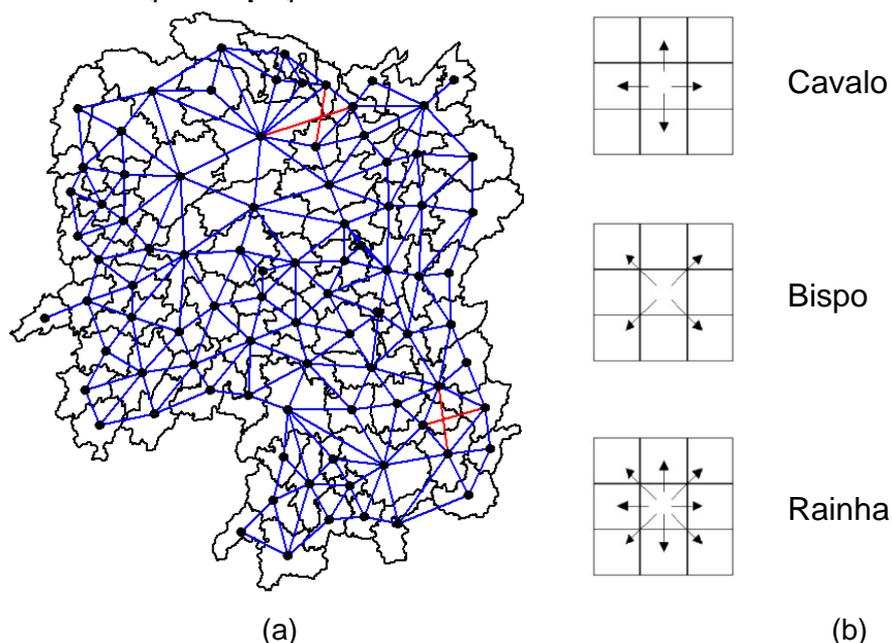
3.4.2.3. Métodos de Econometria Espacial

Os Métodos de Econometria Espacial representam uma família de técnicas estatísticas que incorporam a localização espacial e a dependência espacial em modelos econômicos. Estes métodos são fundamentais quando a proximidade geográfica entre as observações influencia suas correlações, exigindo que a análise econômica leve em conta não apenas as características intrínsecas de uma localização, mas também as influências das localizações vizinhas.

O método utiliza uma matriz de pesos espaciais, usada para representar as relações espaciais entre diferentes unidades geográficas, como regiões, pontos ou pixels. Essas matrizes descrevem como as unidades espaciais estão conectadas entre si e quantificam a "proximidade" ou a influência espacial que uma unidade exerce sobre as outras. As matrizes comumente usadas são as matrizes de contiguidade, de vizinhança (k-NN) e de distância.

As matrizes de contiguidade são usadas para representar o compartilhamento de fronteira entre polígonos. Elas são matrizes binárias $n \times n$ onde $W_{ij} = 1$ se o elemento i faz fronteira com elemento j e 0 caso contrário. Há três esquemas de compartilhamento de fronteira, por aresta (Cavalo), vértice (Bispo) ou ambos (Rainha), conforme Figura 3.9.

Figura 3.9 - Representação da relação de contiguidade entre polígonos. a) Mapa com as linhas de contiguidade. As linhas em vermelho são geradas pelo compartilhamento de vértice. b) Os esquemas de fronteiras, nomeada conforme movimentação de peças de xadrez.



Fonte: (Erika Aldisa, 2020)

As matrizes de vizinhança são matrizes com mesma estrutura da contiguidade, porém ela considera k número de vizinhos mais próximos. Essa matriz foi utilizada na metodologia com 5 vizinhos mais próximos. Já matriz de distância armazena o valor do inverso da distância para cada par de elemento.

Com a matriz de pesos espaciais e variáveis definidas, deve-se avaliar se há autocorrelação espacial entre as variáveis. A autocorrelação espacial refere-se ao grau em que uma observação em um local está correlacionada com observações em locais próximos. O teste mais comum para avaliar autocorrelação espacial é o teste Moran I. Sua fórmula é a razão entre a soma ponderada do produto de cada observação e a média da observação e o produto cruzado da variável de interesse, ajustado pelos pesos espaciais usados.

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.15)$$

Onde:

I valor do índice de Moran I. Valores positivos indicam autocorrelação positiva (similaridade espacial), valores negativos indicam autocorrelação negativa (dissimilaridade espacial), e valores próximos a zero indicam uma distribuição espacial aleatória;

n Representa o número total de observações ou unidades espaciais na análise;

w_{ij} É o elemento da matriz de pesos espaciais que define a influência ou a relação espacial entre a unidade i e a unidade j . Estes pesos podem ser baseados em contiguidade, distância ou outra medida de relação espacial;

y_i É o valor da variável de interesse na unidade espacial i ;

\bar{y} É a média dos valores da variável de interesse em todas as unidades espaciais.

Além dos testes de autocorrelação, recomenda-se aplicar os testes de multiplicador de Lagrange para identificar se há autocorrelação no erro ou na variável dependente. Na análise espacial, especificamente no contexto dos modelos econométricos espaciais, os testes baseados no multiplicador de Lagrange são empregados para verificar a presença de autocorrelação espacial em um modelo de regressão.

Quando um modelo de regressão é ajustado a dados geográficos, é possível que os resíduos não sejam independentes, mas sim espacialmente correlacionados.

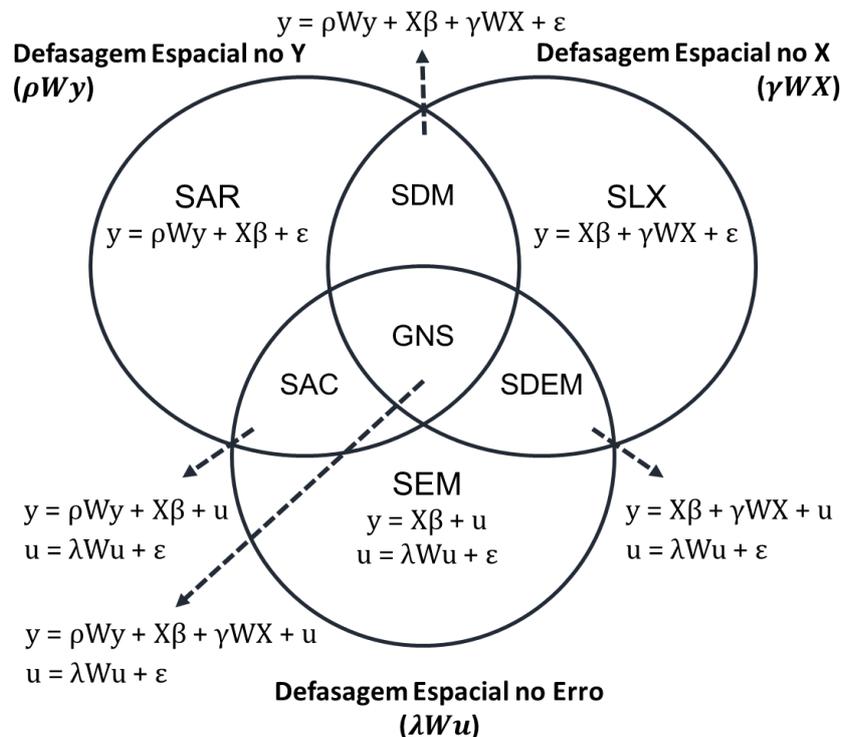
Os testes do multiplicador de Lagrange ajudam a detectar se essa autocorrelação está presente, indicando que o modelo pode precisar ser ajustado para levar em conta os efeitos espaciais. Os testes mais comuns baseados em multiplicadores de Lagrange na análise espacial incluem:

Teste LM para erro espacial (LMerr): Este teste procura por autocorrelação espacial nos termos de erro do modelo de regressão. Se houver significância estatística, pode ser um indicativo de que um modelo de erros espaciais (*Spatial Error Model - SEM*) seria mais apropriado.

Teste LM para defasagem espacial (LMlag): Esse teste verifica a autocorrelação espacial na variável dependente. Um resultado significativo pode sugerir que um modelo de retardo espacial (*Spatial Lag Model - SLM*) ou um modelo Durbin (*SDM - Spatial Durbin Model*) seja mais adequado.

Os testes de multiplicador de Lagrange são realizados sob a hipótese nula de não autocorrelação espacial. Se a hipótese nula é rejeitada (geralmente se o p-valor é menor que 0,05), indica-se a necessidade de incorporar a estrutura espacial no modelo. Os principais modelos de econometria espacial encontram-se representados na Figura 3.10.

Figura 3.10 - Principais formulações de modelos de econometria espacial.



Fonte: adaptado de Bui; Wen; Sharp (2022).

SLX (Spatial Lag of X Model): Modelo de Defasagem Espacial de X

$$y = \beta X + \gamma WX + \varepsilon \quad (3.16)$$

Onde:

y a variável dependente;

W matriz de pesos espaciais, definindo a relação espacial entre as observações;

X conjunto de variáveis independentes;

β coeficientes das variáveis independentes;

γ os coeficientes associados à defasagem espacial das variáveis independentes;

ε termo de erro.

SEM (Spatial Error Model): Modelo de Erro Espacial

$$\begin{aligned} y &= \beta X + u \\ u &= \lambda W u + \varepsilon \end{aligned} \quad (3.17)$$

Onde:

y a variável dependente;

W matriz de pesos espaciais, definindo a relação espacial entre as observações;

X conjunto de variáveis independentes;

β coeficientes das variáveis independentes;

λ os coeficientes associados à defasagem espacial dos erros;

ε termo de erro.

SAR (Spatial Autoregressive Model): Modelo Autorregressivo Espacial

$$y = \rho W y + \beta X + \varepsilon \quad (3.18)$$

Onde:

y a variável dependente;

W matriz de pesos espaciais, definindo a relação espacial entre as observações;

X conjunto de variáveis independentes;

β coeficientes das variáveis independentes;

ρ coeficiente de autocorrelação espacial da variável dependente;

ε termo de erro.

SDEM (Spatial Durbin Error Model): Modelo de Erro Durbin Espacial

$$\begin{aligned} y &= \beta X + \gamma WX + u \\ u &= \lambda W u + \varepsilon \end{aligned} \quad (3.19)$$

Onde:

y a variável dependente;

W matriz de pesos espaciais, definindo a relação espacial entre as observações;
 X conjunto de variáveis independentes;
 β coeficientes das variáveis independentes;
 γ os coeficientes associados à defasagem espacial das variáveis independentes;
 λ os coeficientes associados à defasagem espacial dos erros;
 ε termo de erro.

SDM (Spatial Durbin Model): Modelo Durbin Espacial

$$y = \rho W y + \beta X + \gamma W X + \varepsilon \quad (3.20)$$

Onde:

y a variável dependente;
 W matriz de pesos espaciais, definindo a relação espacial entre as observações;
 X conjunto de variáveis independentes;
 β coeficientes das variáveis independentes;
 ρ coeficiente de autocorrelação espacial da variável dependente;
 γ os coeficientes associados à defasagem espacial das variáveis independentes;
 ε termo de erro.

SAC (Spatial Autoregressive Combined Model): Modelo Autorregressivo Combinado Espacial

$$y = \rho W y + \beta X + \gamma W X + u \quad (3.21)$$

$$u = \lambda W u + \varepsilon$$

Onde:

y a variável dependente;
 W matriz de pesos espaciais, definindo a relação espacial entre as observações;
 X conjunto de variáveis independentes;
 β coeficientes das variáveis independentes;
 ρ coeficiente de autocorrelação espacial da variável dependente;
 λ os coeficientes associados à defasagem espacial dos erros;
 ε termo de erro.

GNS (General Nesting Spatial Model): Modelo Espacial de Aninhamento Geral

$$y = \rho W y + \beta X + u \quad (3.22)$$

$$u = \lambda W u + \varepsilon$$

Onde:

Y a variável dependente;

W matriz de pesos espaciais, definindo a relação espacial entre as observações;
 X conjunto de variáveis independentes;
 β coeficientes das variáveis independentes;
 ρ coeficiente de autocorrelação espacial da variável dependente;
 γ os coeficientes associados à defasagem espacial das variáveis independentes;
 λ os coeficientes associados à defasagem espacial dos erros;
 ε termo de erro.

Diferentemente dos modelos de regressão linear múltipla normais, os coeficientes nos modelos de autorregressão espacial com defasagem espacial nas variáveis não podem ser interpretados diretamente. Isso se deve à presença de dependência espacial, onde os valores de uma variável em um local podem influenciar e ser influenciados pelos valores em locais vizinhos. Como resultado, é necessário avaliar os impactos diretos, indiretos e totais das variáveis para entender plenamente as relações espaciais. Após os testes dos modelos e a seleção daquele que melhor ajusta aos dados, deverá avaliar os impactos diretos, indiretos e totais das variáveis. (Golgher; Voss, 2016)

Os impactos diretos representam o efeito de uma variável independente sobre a variável dependente na mesma unidade espacial.

Os impactos indiretos (*spillovers*) capturam a influência de uma variável independente sobre a variável dependente em unidades espaciais vizinhas, refletindo o efeito de transbordamento.

Já os impactos totais são a soma dos impactos diretos e indiretos, fornecendo uma medida completa do efeito de uma variável independente sobre a variável dependente considerando todas as interações espaciais.

Deste modo, para modelos como o Modelo Autorregressivo Espacial (SAR), Modelo de Defasagem Espacial de X (SLX), Modelo Durbin Espacial (SDM), Modelo de Erro Durbin Espacial (SDEM), Modelo Autorregressivo Combinado Espacial (SAC) e Modelo Espacial de Aninhamento Geral (GNS), a interpretação correta dos coeficientes requer essa decomposição para que se possa entender plenamente como as variáveis afetam não apenas a unidade espacial em análise, mas também suas vizinhas. A valorização imobiliária será considerada como o impacto total das variáveis relacionadas às cheias urbanas.

3.5. BENEFÍCIOS DOS SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS

A seguir são descritos os procedimentos metodológicos para obtenção da economia de água potável pelo aproveitamento de água de chuva e da economia de energia elétrica na redução de refrigeração do ambiente das edificações pelo isolamento térmico dos telhados verdes.

3.5.1. Economia de Água Potável

A economia de água pelo sistema de captação de água da chuva foi obtida pela diferença entre o custo médio mensal de água com e sem reservatório de aproveitamento de água de chuva (AAC). Os usos para aproveitamento de água de chuva considerados foram de irrigação, lavagem de piso, lavagem de carros e água de descarga de banheiro, como mostrado na Quadro 3.5. A demanda de água foi calculada com o número médio de moradores por domicílio e o consumo per capita. A redução do volume de água é o mínimo entre a demanda de água da chuva e o volume de água disponível. O volume anual disponível de água para a demanda de uso de água da chuva é obtido pela Equação 3.23.

$$V_{disp} = \frac{P_{anual}}{P_{max} + P_{FF}} \times V_{dom} \quad (3.23)$$

Onde

V_{disp} Volume de água de chuva disponível, em m³;

P_{anual} Precipitação anual, em mm;

P_{FF} Volume do *first flush* descartado, em mm;

$P_{máx}$ Capacidade de retenção do reservatório, em mm;

V_{dom} Volume do reservatório por domicílio, em m³

Quadro 3.5 – Consumo de água considerado para o aproveitamento de água de chuva.

Uso	Padrão de consumo
Descarga de vaso sanitário	21% do consumo de água interno (GONÇALVES, 2009)
Lavagem de carros	50 L/dia por veículo duas vezes por mês (MAY, 2004)
Lavagem de pisos	0,7 L/m ² /dia 2 vezes por semana (NASCIMENTO; SANT'ANA, 2014)
Irrigação	1,5 L/m ² /dia 3 vezes por semana no período seco (VÉROL; VAZQUEZ; MIGUEZ, 2019)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5.2. Economia de Energia Elétrica

Para obter a economia de energia do telhado verde, utilizou-se a Equação 3.24 da metodologia de CNT (2010). A diferença do coeficiente global de transferência de calor entre o telhado verde e o telhado de laje pré-moldada foi obtida a partir de Morishita *et al.* (2010), que considera 2,29 W/ °C·m² para telhados de laje pré-moldada e de Ferraz (2012), que obteve o valor de 0,20 W/°C·m² para telhados verdes. O parâmetro *cooling degree days* foi adaptado ao valor de hora em hora, dado o fato de que os dados da estação climatológica do INMET são horários. O *cooling degree hours* é obtido pela soma das diferenças positivas entre a temperatura média de uma hora e a temperatura de equilíbrio ao longo do ano, como mostrado na Equação 3.25.

$$B_{TV} = \frac{cdh \times \Delta U \times \overline{C_e}}{1000} \quad (3.24)$$

$$cdh = \sum_i T_i - T_B \quad (3.25)$$

Onde:

B_{TV}	Redução de custo de energia elétrica pelo telhado verde, em R\$/m ²
cdh	Cooling degree hours, em °C h
ΔU	Diferença no coeficiente global de transferência de calor, em W/°C·m ²
$\overline{C_e}$	Custo médio de energia elétrica, em R\$/kWh
T_i	Temperatura no intervalo i, em °C;
T_B	Temperatura de balanço, em °C

3.6. CUSTOS DE INSTALAÇÃO E MANUTENÇÃO

Os custos de instalação das medidas de drenagem urbana sustentável variam de acordo com os modelos, espessuras das camadas e materiais utilizados. Poderá ser elaborado uma estimativa orçamentária utilizando tabelas de preços de serviços e insumos disponíveis, como o SCO-RIO (Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, 2006) ou Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI).

No que diz respeito às coberturas verdes, há poucas referências de custos na literatura nacional. O Quadro 3.18 apresenta alguns valores de referência para diversos tipos de coberturas verdes. Esses valores devem ser aplicados considerando as composições e considerações utilizadas na sua obtenção, e devem ser atualizados para a data presente, levando em conta a inflação.

Quadro 3.18 - Preços unitários de coberturas verdes encontrados na literatura nacional. Os preços são referentes às datas das publicações.

REFERÊNCIA	MODELO	PREÇO UNITÁRIO
(OICS, [s.d.])	Diversos	R\$ 225,00/m ²
(Guedes <i>et al.</i> , 2020)	Telhado Verde Laminar	R\$ 223,83/m ²
(Köhler; Poll, 2010; Silva, 2016)	<i>Modern Extensive Greenroof</i> (MEG)	R\$ 67,00/m ²
(Savi, 2012, p. 122)	Sistema Hexa Ecotelhado	R\$ 87,24/m ²

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já os reservatórios poderão ser considerados modelos pré-fabricados ou construídos *in loco*. Em caso de modelos pré-fabricados, é recomendando a pesquisa de preços de pelo menos três fornecedores, aplicando a média dos valores obtidos. Já para os reservatórios construídos *in loco*, deverá ser elaborado orçamento considerando os materiais e serviços relacionados.

Os custos de manutenção das coberturas verdes por metro quadrado foram considerados como um volume diário de água para irrigação calculado como 1,5 L/m²/dia três vezes por semana no período seco (Vérol; Vazquez; Miguez, 2019) e o serviço semestral (Ballard *et al.*, 2015, p. 252) de “manutenção e recomposição de áreas ajardinadas, corte de folhas e ramos secos, retirada de parasitas, limpeza e replantio de arbustos” (PJ 20.05.0550 (A)) do SCO-RIO.

Para os reservatórios de lote foi considerado o serviço anual (Ballard *et al.*, 2015, p. 229) de “limpeza manual de reservatórios d'agua (cisterna e caixas d'agua elevadas)” (SC 35.10.0350) do SCO-RIO.

Os jardins de chuva tiveram seu custo de manutenção calculado igualmente às coberturas verdes. Já para os pavimentos permeáveis, foram previstos serviços anuais de varredura, jateamento de água quente e sucção (Ballard *et al.*, 2015, p. 429–430), conforme Quadro 3.19.

Quadro 3.19 - Composição do serviço de limpeza de pavimento permeável com jato d'água quente, varredura e sucção.

COD. SCO	SERVIÇO	UN.	QNT.
1	Limpeza de pavimento permeável com jato d'água quente, varredura e sucção. Anualmente.	m ²	1
1.1	<i>IEQ014050 Lavadora de alta pressão, de 166/2400 (bar/psi), tensão 220/380V, modelo CSL 2400 FST, Electrolux ou similar</i>	un	0,000183 ¹
1.2	<i>SC 10.05.1450 Servente (inclusive encargos sociais).</i>	h	0,3600
1.3	<i>PJ 20.05.0909 (A) Varredura de folhas, papéis e etc., em área pavimentada.</i>	ha	0,0001
1.4	<i>Fornecedor Aspirador de Pó e Água 2,75 kW, Sucção 235 mba. Reservatório 65 L. Locação diária.</i>	un	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.7. ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO

A análise de custo-benefício é o método mais comum para avaliar projetos e investimentos, considerando a relação entre custos e benefícios ao longo do tempo. Os indicadores utilizados para a análise custo-benefício neste trabalho são: Valor Presente Líquido (VPL), Relação Custo-Benefício (RCB), Tempo de retorno e Taxa Interna de Retorno (TIR). Suas formulações encontram-se a seguir.

3.7.1. Valor Presente Líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido (VPL) é um indicador financeiro que determina o valor atual dos fluxos de caixa futuros descontados, subtraindo o investimento inicial. É considerado um dos melhores critérios para avaliação de projetos, pois reflete o valor adicionado pelo investimento e pode ser obtido a partir da Equação 3.26 (Pasqual, Padilla, Jadotte, 2013).

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (3.26)$$

3.7.2. Relação Custo-Benefício (RCB)

A Relação Custo-Benefício (RCB) compara os benefícios totais de um projeto, expressos em valor presente, com seus custos totais. Uma RCB superior a 1

¹ A quantidade considerada foi igual ao serviço "limpeza ou preparo de superfície de concreto com jato d'água quente com pressão mínima de 2400lb, solvente e escova de piaçava." (SC 34.15.0100 (/) do SCO-RIO.

indica que os benefícios superam os custos, justificando o investimento. Este índice é amplamente utilizado para avaliar a viabilidade econômica de projetos, especialmente em contextos de infraestrutura e políticas públicas (MA, MA, 2013).

3.7.3. Tempo de Retorno

O Tempo de Retorno, ou período de payback, mede o tempo necessário para que o valor dos fluxos de caixa acumulados de um investimento iguale o montante inicialmente investido. Embora simples, este indicador não considera o valor do dinheiro ao longo do tempo, o que pode levar a avaliações menos precisas em comparação com métodos que incluem a taxa de desconto (Cheremisinoff, Bendavid-Val, 2001).

3.7.4. Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa de desconto que iguala o valor presente dos fluxos de caixa futuros ao investimento inicial e pode ser calculada a partir da Equação 3.27. É um critério popular para avaliação de investimentos, pois indica a rentabilidade de um projeto. Entretanto, pode apresentar múltiplos valores ou ser inviável em certos casos, o que requer análise cuidadosa (Vélez-Pareja, 2010).

Em suma, esses indicadores fornecem uma base sólida para a tomada de decisão em investimentos, cada um com suas particularidades e aplicações recomendadas, dependendo do contexto e dos objetivos do avaliador.

$$\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} = I_0 \quad (3.27)$$

4. ESTUDO DE CASO - BACIA DO CANAL DO MANGUE – BCM

O principal fator de escolha da bacia hidrográfica do Canal do Mangue (BCM) para a aplicação do método, nesta dissertação, é a sua representatividade urbana e o seu relevo. A BCM detém uma boa diversidade de tipologias de edificações, contando com unidades residenciais unifamiliares e multifamiliares, além de unidades comerciais de características diversas. Já em relação ao seu relevo, a BCM apresenta uma variação abrupta de declividades, com região de baixada densamente urbanizada cercada de montanhas; causando

escoamentos acelerados para a região de baixada, onde não há espaço para desacelera-los, tornando a bacia susceptível a inundações. Além disso, tal característica é representativa de diversas outras cidades costeiras brasileiras. Outros fatores relevantes e característicos dessa bacia podem ser elencados a seguir:

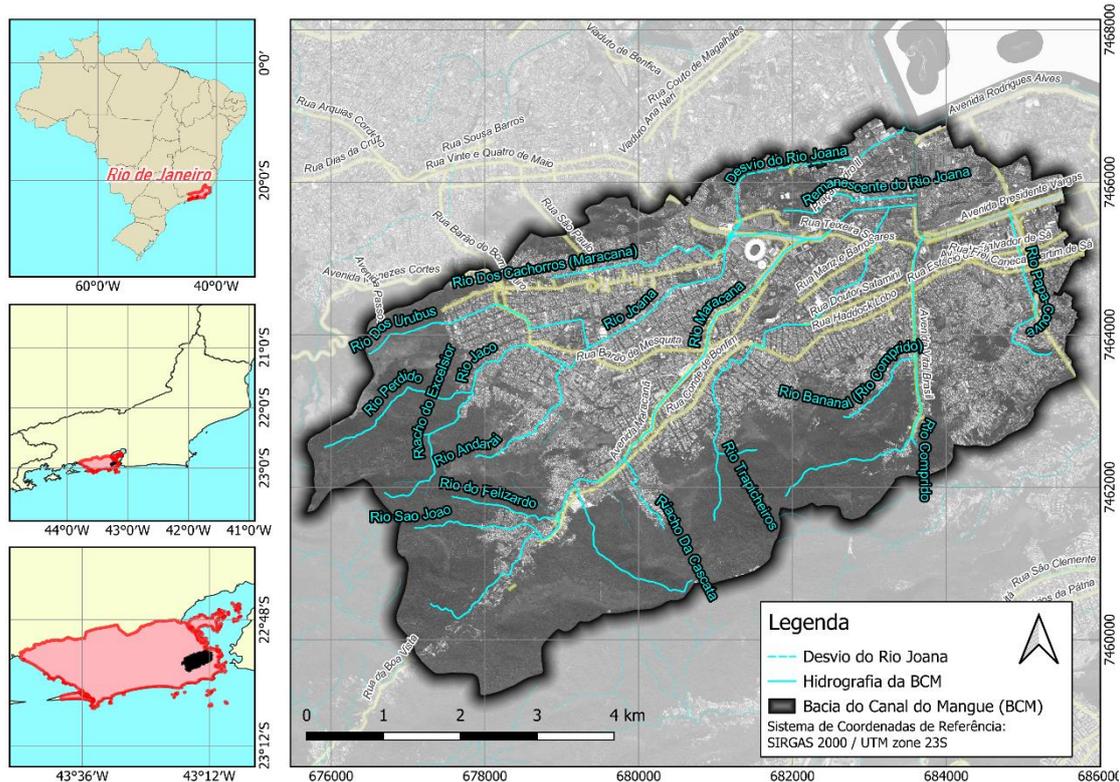
- Importância geográfica: a BCM está localizada entre a zona central e norte da cidade do Rio de Janeiro.
- Importância econômica: a BCM detém sistemas viários fundamentais para o transporte da cidade com alta susceptibilidade às cheias urbanas.
- Importância histórica: a BCM apresenta graves problemas históricos de cheias urbanas, tendo sido objeto de diversas medidas estruturais de drenagem de grande porte e de estudos acadêmicos.

4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A Bacia do Canal do Mangue (BCM) está inserida na Bacia Hidrográfica da Baía da Guanabara e localizada na região central do município do Rio de Janeiro. O mapa de localização está apresentado na Figura 4.1.

Em relação aos limites administrativos, a BCM está localizada na Zona Norte da cidade. Ela contempla as Áreas de Planejamento (AP) 1 e 2 e as Regiões Administrativas (RA) Portuária (RA-1), Centro (RA-2), Rio Comprido (RA-3), São Cristóvão (RA-7), Tijuca (RA-8), Vila Isabel (RA-9) e Santa Teresa (RA-23). A bacia contém os bairros da Tijuca, Grajaú, Vila Isabel, Maracanã, Andaraí, Alto da Boa Vista, Rio Comprido, Praça da Bandeira e intersecciona os bairros de São Cristóvão, Catumbi, Centro, Cidade Nova, Estácio, Mangureira, Santo Cristo e Santa Teresa.

Figura 4.1 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Canal do Mangue.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A bacia do Canal do Mangue possui uma área de drenagem de 45,4 km², tendo como principais corpos hídricos os rios Maracanã, Trapicheiros, Joana, Comprido e Papa-Couve. Apresenta-se a seguir uma breve descrição de cada um deles, que podem ser visualizados no mapa da Figura 4.2.

O **Rio Maracanã** tem sua nascente junto à Pedra do Conde, na Floresta da Tijuca, na elevação de 730m, percorrendo uma extensão de 8,5 km até sua foz, no Canal do Mangue. Até a região do Largo da Usina ele recebe inúmeros afluentes, entre eles, o Rio São João. Após o Largo da Usina, o Rio Maracanã percorre seu trecho urbano até a foz no Canal do Mangue.

O **Rio Trapicheiros** tem sua nascente próxima ao Alto do Sumaré, na Floresta da Tijuca, na elevação aproximada de 300 m, percorrendo a extensão de 5,9 km até a foz no Rio Maracanã. Em virtude da implementação de um extravasor, atualmente a vazão na foz do Rio Trapicheiros é dividida entre o Rio Maracanã e o Canal do Mangue.

O **Rio Joana** tem sua nascente junto ao Pico do Andaraí Maior, na Floresta do Grajaú, na elevação de 600m. Ele é formado pelos Rios Perdido e Jacó e percorre uma extensão total de 8,0 km até sua foz, no Rio Maracanã.

Já o **Rio Comprido** tem sua nascente em uma área de mata nativa localizada na Serra do Sumaré, junto ao Morro do Sumaré, na elevação 590 m. Este rio percorre uma extensão de 4,5 km até sua foz no Canal do Mangue.

Por fim, o **Rio Papa-Couve** tem sua nascente em uma área bastante antropizada localizada no morro do Catumbi. Ele percorre 2,9 km até sua foz no Canal do Mangue, dos quais 600 m correspondem à sua extensão em seção aberta.

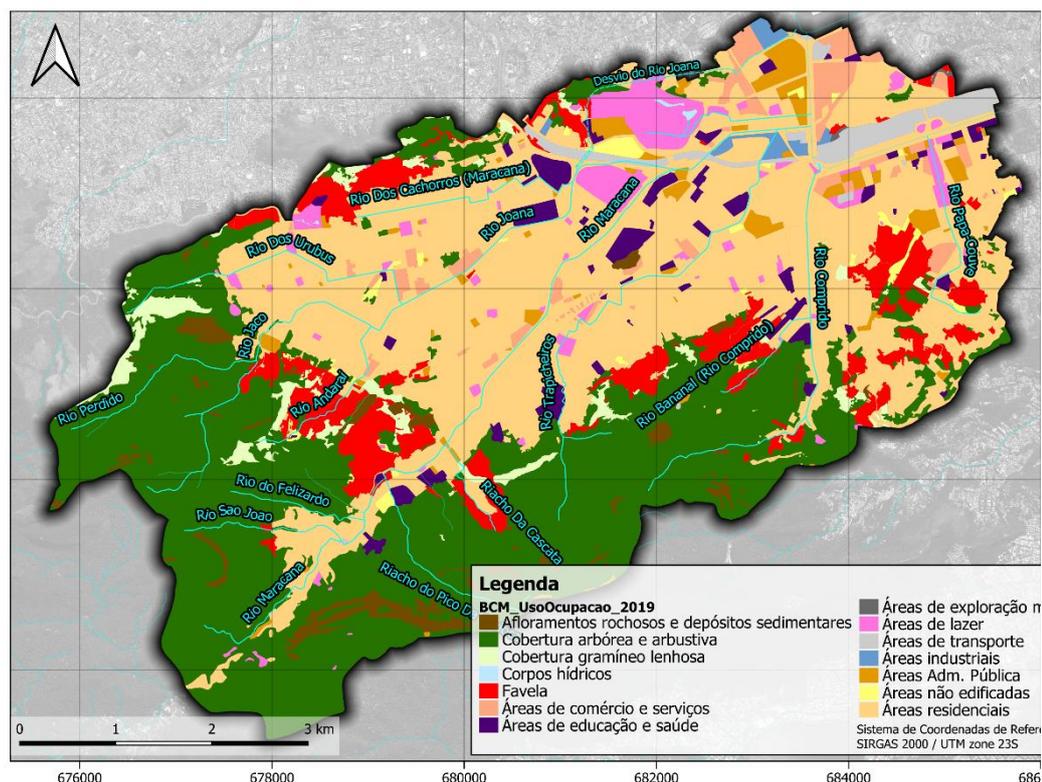
O relevo da bacia é caracterizado por desnível acentuado do Maciço da Tijuca na região oeste e sudoeste, seguido por uma planície altamente urbanizada, conforme observado na Figura 4.2. As principais montanhas que formam o Maciço da Tijuca são: o Pico da Tijuca, a Pedra da Gávea, o Bico do Papagaio, o Pico da Cocanha, o Pico Tijuca Mirim, o Pico do Andaraí Maior e o Corcovado, onde se localiza o Cristo Redentor.

Grande parte das encostas da bacia encontram-se preservadas por florestas nativas, vegetação rasteira ou replantadas. Porém, é possível identificar edificações irregulares ocupando regiões de encosta, contribuindo fortemente para a instabilidade geológica das mesmas. Já a região mais plana é fortemente urbanizada. Cerca de 51,1% da área urbana da BCM tem declividade inferior a 5% e 70,2% tem declividade inferior a 10%, conforme apresentado na Figura 4.3.

Em relação ao uso e ocupação do solo da BCM, destaca-se que sua cobertura predominante é a urbana, correspondendo a 59% da sua área total, sendo o maior uso correspondente a áreas residenciais, seguido pela cobertura arbórea a arbustiva, que corresponde a 38% da área da bacia, conforme pode ser visto na Figura 4.4.

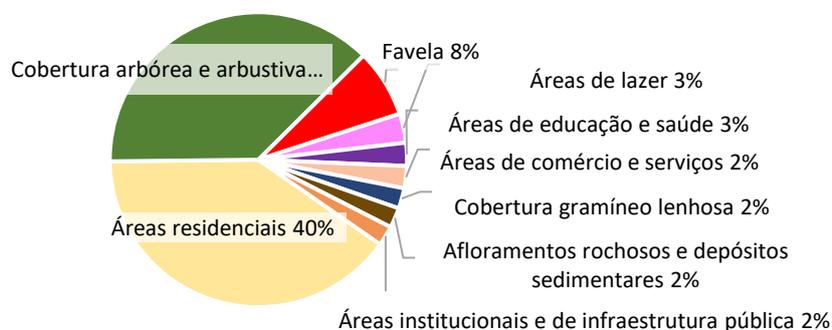
Figura 4.4 – a) Mapa de uso e ocupação de solo da BCM. b) Gráfico de porcentagem por uso e ocupação do solo da BCM.

a)



b)

Uso e Ocupação do Solo da BCM (%)



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados do Data.Rio (IPP, [S.d.]).

4.2. BREVE HISTÓRICO DA BACIA DO CANAL DO MANGUE

Para compreender as causas de eventos de cheias na BCM, além dos aspectos físicos e da alta impermeabilidade da bacia apresentados anteriormente, deve-se ter o entendimento do seu histórico de ocupação.

O atual Canal do Mangue era, na verdade, um braço de mar que adentrava o continente até a região do atual sambódromo, conhecido como Saco de São Diogo, que era cercado por um manguezal e por regiões alagadiças.

Com a vinda de D. João VI para o Brasil, de 1808 a 1821 houve uma rápida multiplicação de edifícios públicos e, com a nova organização econômica baseada na libertação comercial e industrial, houve também um grande surto de oficinas e fábricas (DELGADO DE CARVALHO, 1990, p. 65). A região de manguezal foi o primeiro obstáculo para a expansão da cidade do Rio de Janeiro. Vale salientar que a característica pantanosa não se limitava ao entorno do saco de São Diogo, mas se estendia até a região da Tijuca, que tem nome na origem da palavra “*tiyug*” do tupi-guarani, que quer dizer “líquido podre”, “pântano”, “lama” (Dicionário [...], [s.d.]); sendo um local insalubre, provocando doenças e infestações; como disse Alexandre Max Kitzinger:

Como se deixasse em abandono já no meio da área urbana, uma vasta extensão de terreno insalubre e paludoso, cortado por um braço de mangue, onde chegava a maré, cobrindo-o nas enchentes – quando a grandes distâncias do centro se edificavam chácaras e residências notáveis – tratou o Governo de extinguir aquele foco de infecção atmosférica, aproveitando-o ao mesmo tempo para dilatar e aformosear a cidade. Lembrou-se o Governo de ceder o terreno a particulares, que se comprometessem a secá-lo e utilizá-lo para construção de prédios, de acordo com uma planta, demarcando as ruas e praças da referida área. A fim de animar os capitalistas, isentou-se o Governo do imposto da décima por cinco, dez, vinte anos... Do Campo de Santana e da lagoa da Sentinela, dirigiu-se então a área da cidade, pelo aterrado, ou Rua das Lanternas (hoje Rua Senador Eusébio), através de ruas e praças – formando a Cidade Nova – para arrabalde de São Cristóvão, ocupando o terreno que fora por todos até essa data desprezado... (Kitzinger [S.d.] apud Delgado de Carvalho, 1990, p. 66)

Com o incentivo fiscal e a necessidade de interligar a cidade aos engenhos e fábricas da época, o manguezal passou por diversas transformações, com a construção de diversos caminhos e aterros para o acesso ao Palácio de São Cristóvão e a execução da canalização do Saco de São Diogo até a Bica dos Marinheiros (atual Viaduto dos Marinheiros) em 1854 (COPPETEC, 2000).

Na Figura 4.5, é possível observar o Saco do São Diogo, já antropizado em 1840, a extensão do antigo mangue e o arruamento atual em linhas cinzas, indicando a resultante brusca redução do espelho d’água da região.

Beaurepaire foram realizadas posteriormente, como a instalação de uma rede de esgotos e a demolição do morro do Castelo para expansão urbana.

A era dos melhoramentos tinha três pontos como alvo: o ponto comercial, com obras de expansão do porto; o ponto higiênico, com a reorganização da saúde pública, e o estético e prático, com a reorganização urbana, tendo sido regidos por Francisco Bicalho, Osvaldo Cruz e Pereira Passos, respectivamente (Delgado de Carvalho, 1990, p. 96). No aspecto urbano, foi aplicada a concepção higienista nos moldes franceses, com a implantação de largas avenidas com medidas de drenagem clássica e o dessecamento de solos úmidos (Magalhães, 2013). Na Figura 4.6 é possível observar o registro da obra de canalização do Rio Maracanã do ano de 1922 e o estado atual do rio.

Figura 4.6 – a) Imagem da construção da Av. Maracanã com vista para montante do rio próximo à atual Praça Varnhagen (1922). b) Imagem atual do mesmo local (2024).



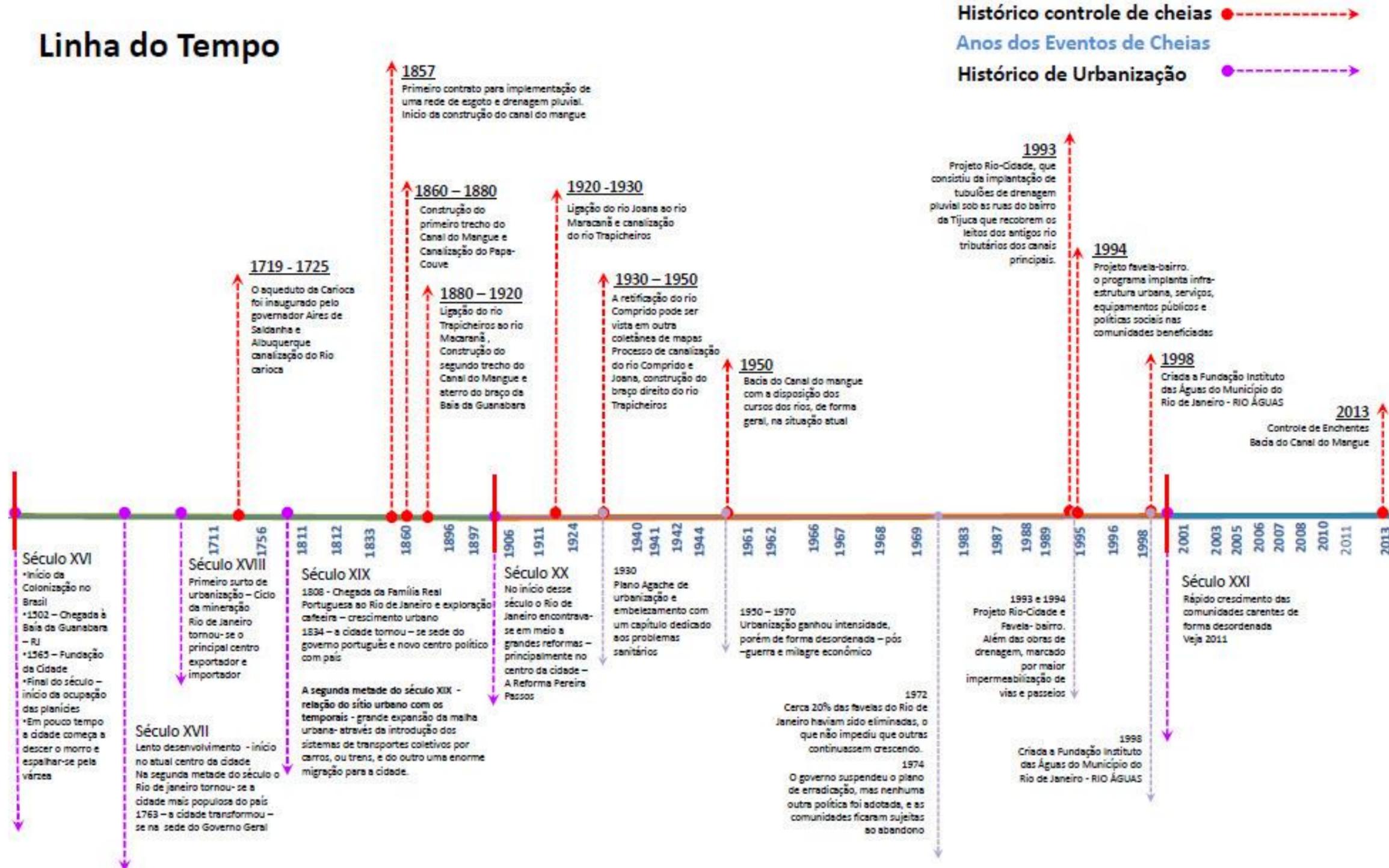
(a)

(b)

Fonte: (IMAGINERIO, [S.d.]) e Google Street View.

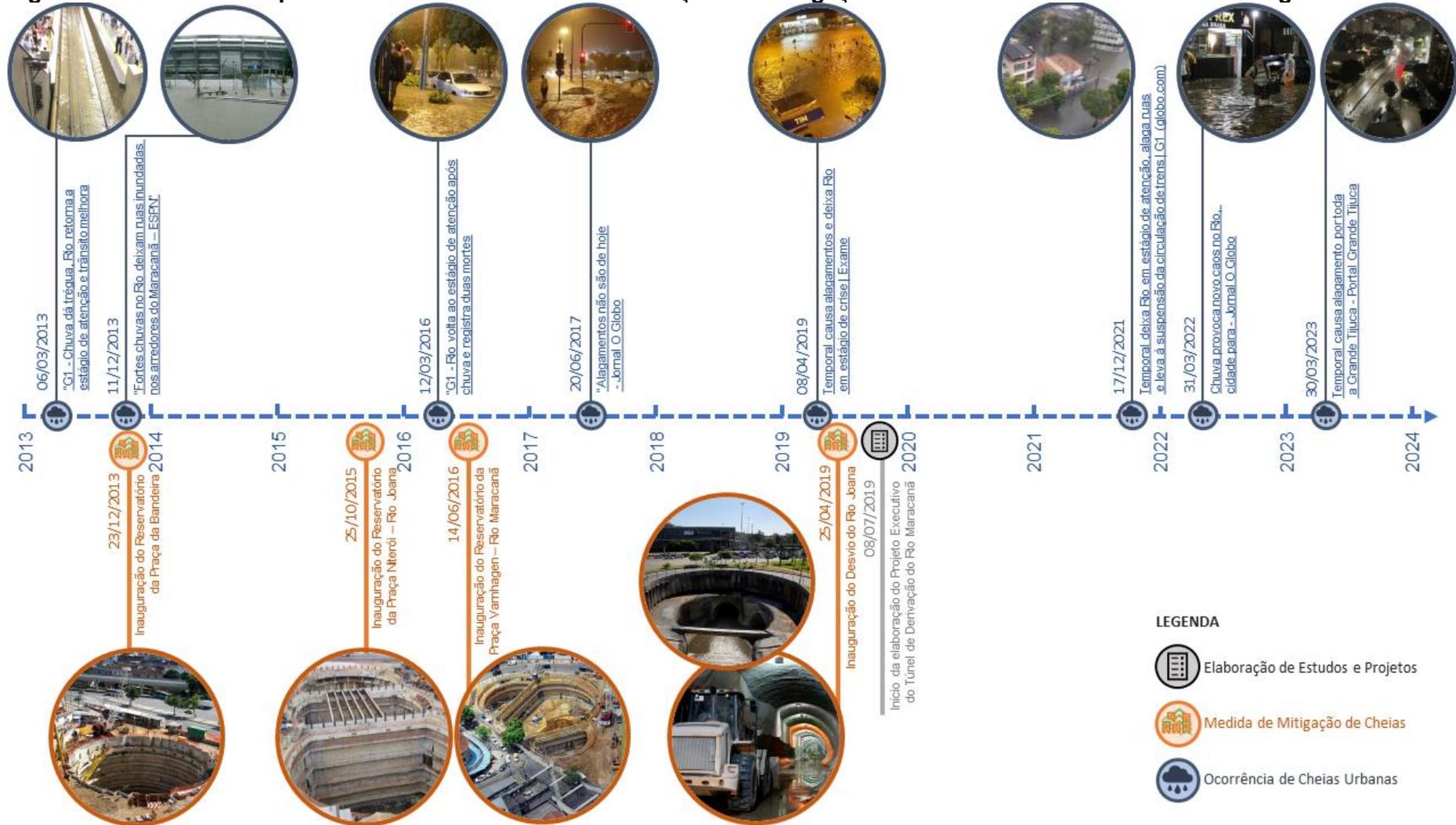
Já na Figura 4.7 é possível observar uma linha do tempo com as principais intervenções históricas na BCM do século XVI até o ano de 2013. Complementarmente à linha do tempo elaborada pela Magalhães (2013), a Figura 4.8 mostra a linha do tempo com as ocorrências de cheias e intervenções implantadas na BCM a partir de 2013.

Figura 4.7 – Linha do tempo de intervenções de drenagem e de urbanização para a Bacia do Canal do Mangue até 2013.



Fonte: (Magalhães, 2013)

Figura 4.8 - Linha do tempo com eventos de cheias e intervenções de mitigação de cheias na Bacia do Canal do Mangue.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3. ÁREAS DE CHEIAS RECORRENTES

Com o desenvolvimento urbano que negligenciou as dinâmicas hidrológicas, a bacia do Canal do Mangue herdou deficiências graves em seu sistema de manejo de águas pluviais, gerando um extenso histórico de cheias ao longo do tempo. Na Figura 4.9, observam-se algumas imagens de eventos marcantes, que indicam que as cheias ocorrem na região desde a metade do século XX.

Figura 4.9 – a) Imagem de alagamento na Praça da Bandeira no ano de 29/01/1940. b) Imagem de alagamento na Praça da Bandeira em 12/03/2016.



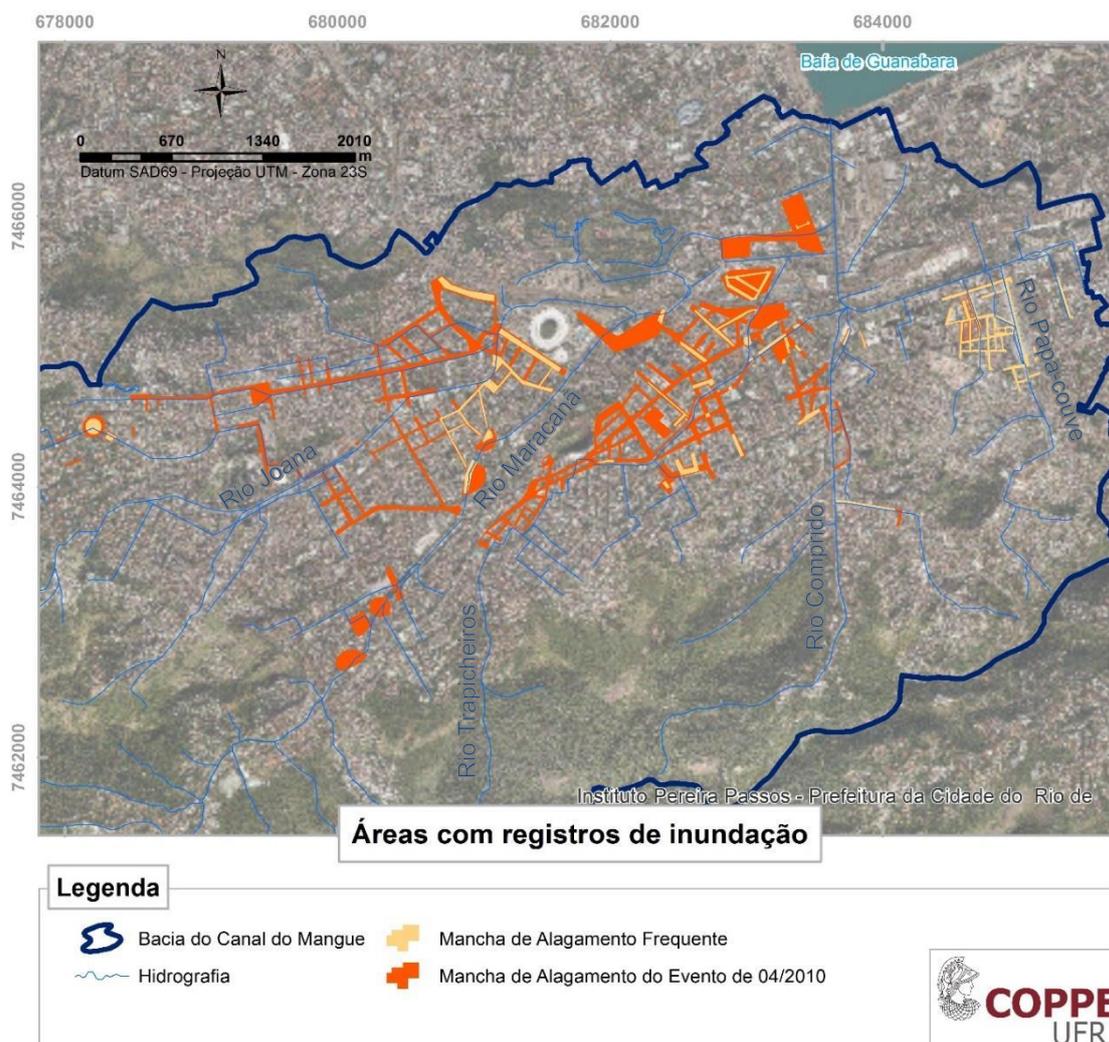
(a)

(b)

Fonte: (IMAGINERIO, [S.d.]) e <https://extra.globo.com/noticias/rio/temporal-alaga-ruas-do-rio-poe-em-xeque-piscinao-dapraca-da-bandeira-18863706.html>, acesso em 17/03/2024.

No Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais - PDMAP (2010), foi elaborado um mapa de inundações referentes às chuvas de 5 e 6 de abril de 2010, com a identificação dos locais em que ocorrem as cheias mais frequentes, conforme apresentado na Figura 4.10. É possível observar uma extensa mancha em torno do Rio Trapicheiros e cheias de maior frequência em torno dos Rios Maracanã e Joana.

Figura 4.10 – Mapeamento de áreas com registro das cheias de abril de 2010 na BCM.



Fonte: (PDMAP, 2010 apud Rezende, 2018)

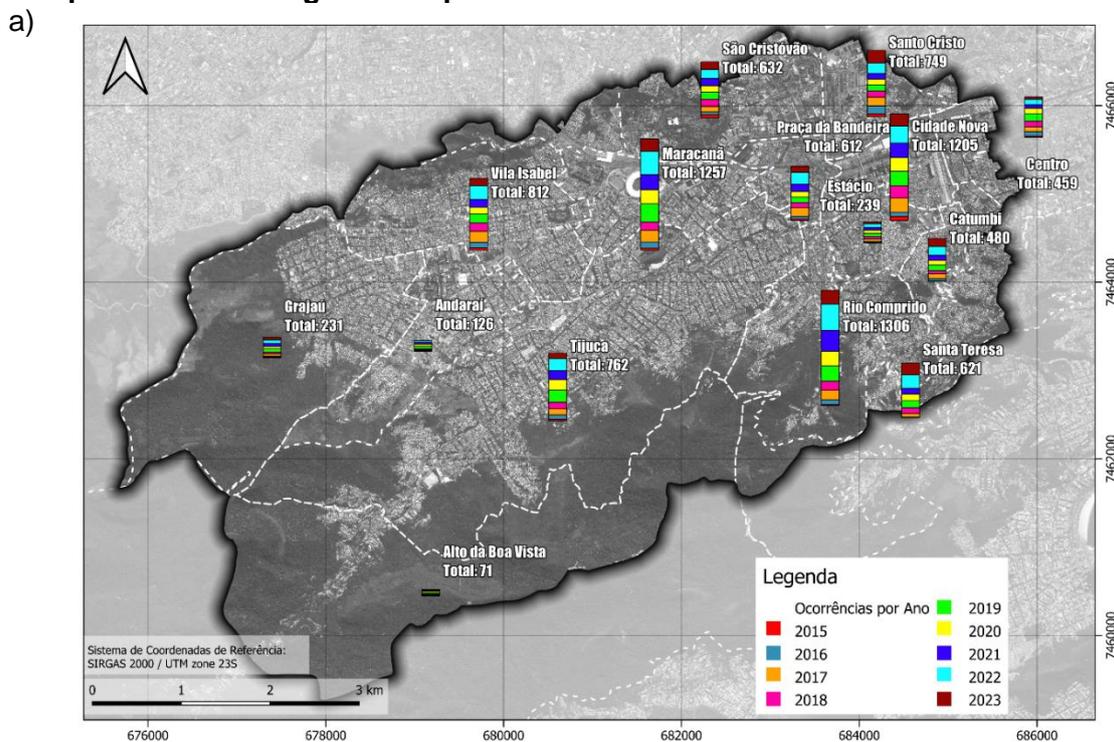
Em relação aos registros de cheias na BCM, os dados de ocorrências do Centro de Operações e Resiliência do Rio (COR) podem servir como indicador de criticidade. O COR surgiu em resposta à intensa chuva de abril de 2010, que paralisou toda a cidade. Desde então, trabalha no monitoramento e na gestão de emergências da cidade do Rio de Janeiro. Ele integra diversas agências governamentais, como a Defesa Civil, a Guarda Municipal, o Corpo de Bombeiros, entre outras, para fornecer uma resposta rápida e coordenada a eventos adversos, como desastres naturais, acidentes de trânsito e crises de segurança pública. (COR RIO, [S.d.])

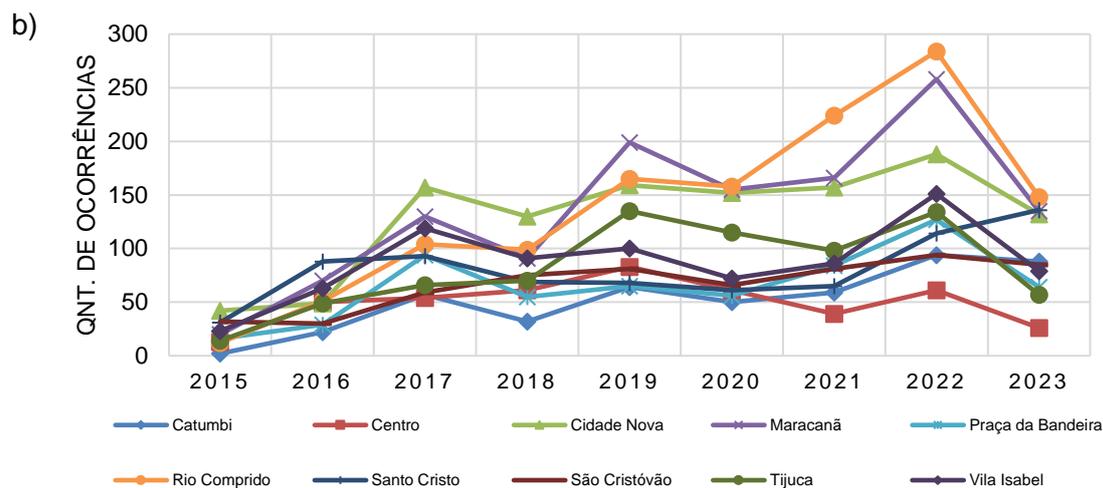
As ocorrências relacionadas às chuvas são majoritariamente obtidas por observação das 2500 câmeras de vigilância espalhadas pela cidade. (COR RIO, [S.d.]) O COR classifica as ocorrências como lâmina d'água, bolsões d'águas,

alagamentos, inundações, enchentes, alagamentos e enchentes. Não há um protocolo claro de classificação da ocorrência e há redundâncias nas classes, impossibilitando uma definição clara da gravidade e do tipo de evento. Vale ressaltar que, pelo fato de as ocorrências estarem associadas às câmeras e outras fontes, sua quantidade pode estar associada à disponibilidade de pontos monitorados. Ou seja, pode-se observar um aumento de número de ocorrências por conta do aumento dos pontos monitorados, o que não necessariamente aponta um agravamento das cheias.

Observando o mapa e o gráfico apresentados na Figura 4.11, os três bairros com maiores quantidades de ocorrências relacionadas às chuvas para o período de 2015 a 2023 são: Rio Comprido (1306), Maracanã (1257) e Cidade Nova (1205). Muitas delas são associadas a obstruções do sistema de captação, necessitando um operário ir ao local para limpeza, ou até mesmo realizar a abertura de tampões de poços de visita, quando a quantidade de bocas-de-lobo é insuficiente.

Figura 4.11 – a) Mapa com diagramas em barras empilhadas com as ocorrências do COR relacionadas às chuvas. b) Gráfico com quantidades de ocorrências do COR por bairro ao longo do tempo. Período dos dados: 2015 – 2023.





Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados do Data.Rio (IPP, [S.d.]).

4.4. PLANOS DE DRENAGEM URBANA

A seguir são apresentados os planos de controle de cheias mais recentes para a Bacia do Canal do Mangue.

4.4.1. Plano de Controle de Enchentes da Bacia do Canal do Mangue

O Plano Diretor de Enchentes da Bacia do Canal do Mangue (Fundação COPPETEC, 2000) propôs diversas medidas estruturais distribuídas ao longo da bacia baseado no método de amortecimento de vazões, de forma distribuída no espaço, recuperando características de retenção superficial e buscando favorecer a infiltração, reduzindo as vazões de pico. Foram previstas 21 intervenções (8 na bacia do Trapicheiro, 6 do Maracanã, 5 do Joana e 2 do Comprido), abrangendo 41,3% da área total da BCM, conforme Quadro 4.1. Além das medidas de atenuação de vazões, o plano propôs reflorestamento, que aumenta a infiltração e evapotranspiração da água da chuva, e correção de singularidades pontuais no sistema de macrodrenagem, melhorando a capacidade hidráulica de escoamento. (Rezende, 2018)

Quadro 4.1 - Intervenções de reservatórios previstos pelo Plano Diretor de Enchentes da Bacia do Canal do Mangue.

Nome da Intervenção	Nome do Rio	Área de Bacia (ha)	Nome da Intervenção	Nome do Rio	Área de Bacia (ha)
Alto Trapicheiro	Trapicheiros	3.952	Alto Maracanã	Maracanã	5.775
Poço dos Esquilos		9.109	São João		3.969
Colégio Batista		17.585	Cachambi		2.053
Hospital Evangélico		1.279	Agostinho		2.739
Parque Bom Pastor		5.04	Cascata		5.9
Valparaíso		5.627	Médio Maracanã		1.13
Chacrinha		4.126	Alto Rio Comprido	Rio Comprido	2.072
Villa-Lobos		16.667	Bananas		5.4
Jacó	Joana	4.57			
Perdido		0.17			
Urubús Recanto do Trovador		1.627			
Ferreira Pontes		1.119			
Andaraí		8.976			

4.4.2. Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais - PDMAP

O Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais (PDMAP, 2010) considerou alternativas de reservação, com a instalação de reservatórios nos pés de morros para controle de *flash floods* e retenção de sedimentos; desconcentração de lançamentos, com transposições e desvios de cursos d'água; e reforço nas canalizações existentes, com correção de singularidades e ampliações de seções hidráulicas.

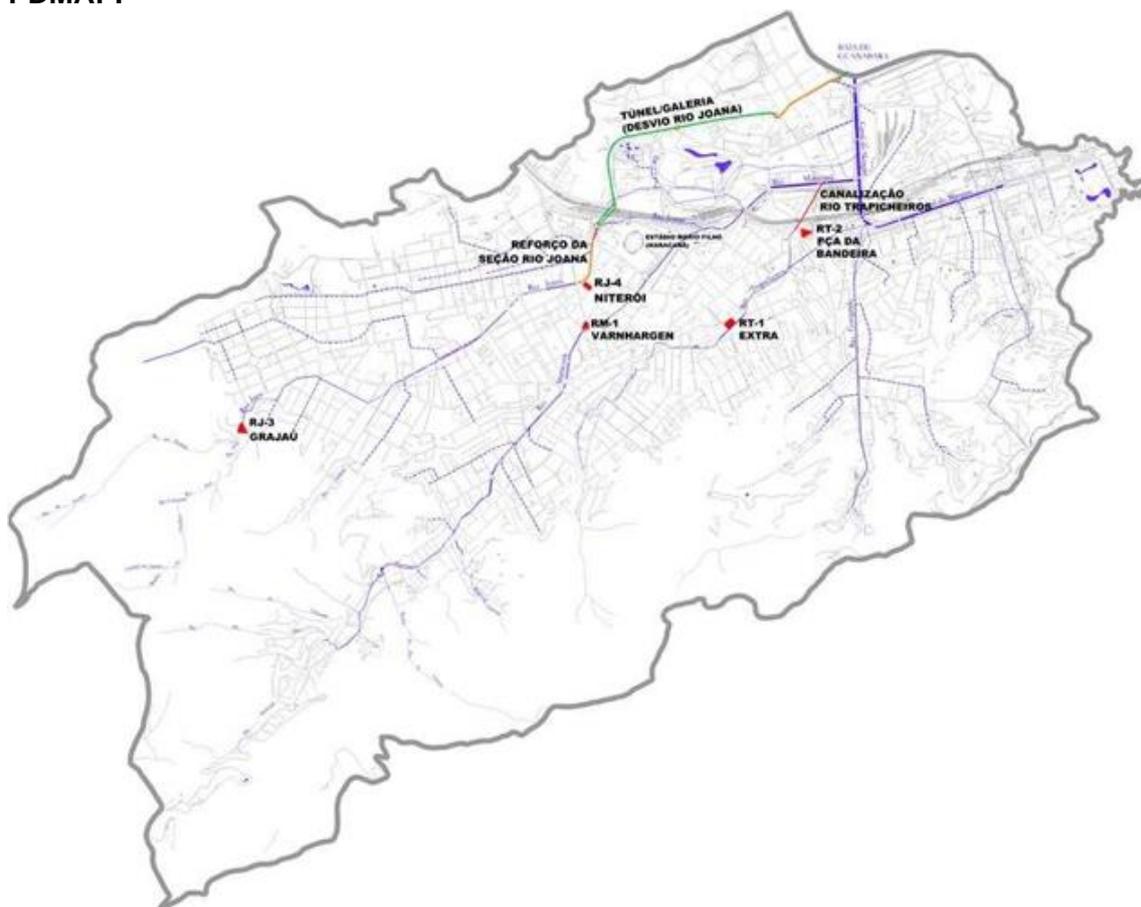
Houve a priorização de medidas de reservação, seja para reduzir a demanda de ampliação de seções hidráulicas ou para reduzir impactos de jusante de intervenções de canalizações a montante. De forma geral, houve uma concentração de propostas, quando comparado com a distribuição espacial de intervenções do plano anterior.

A hierarquização das alternativas do plano seguiu as premissas enumeradas a seguir:

- 1) Abordar primeiramente os problemas mais graves, priorizando as áreas de maior densidade demográfica, onde ocorrem inundações frequentes, que provocam maiores danos. Implantar primeiramente os reservatórios previstos nos cursos d'água mais importantes, situados nas áreas de baixada, e depois os dos afluentes, localizados nas cabeceiras. Garantir que a implantação das obras de reserva previstas para as áreas de baixada proteja contra as cheias de período de retorno até 10 anos. Em etapa posterior, implantar os reservatórios de pés de morro e nos afluentes para proporcionar aumento dos níveis de proteção até atender as chuvas com período de retorno de 25 anos.
- 2) Implantar um reservatório para receber as vazões provenientes de um reforço de canalização a montante, se necessário. As obras de reforço de capacidade das galerias e canais somente poderão ser executadas quando houver exutório capaz de comportar a vazão adicional, ou quando a canalização proposta tiver por exutório o oceano ou uma lagoa natural. Caso contrário, deve-se implantar primeiro o reservatório de amortecimento cuja capacidade deverá comportar a vazão adicional.
- 3) Implantar as medidas de reforço e reserva antes de solucionar estrangulamentos pontuais na rede. Remover os estrangulamentos localizados, tais como travessias e interferências, somente quando houver capacidade a jusante para acomodar o aumento da vazão decorrente da desobstrução.
- 4) Priorizar obras em áreas públicas, uma vez que as intervenções realizadas nessas áreas podem ser executadas em menor prazo, antes da execução das outras obras que envolvem áreas particulares, proporcionando algum tipo de benefício ao sistema.

Seguindo tais premissas, o PDMAP definiu um plano de ação para a Bacia do Canal do Mangue com a combinação de reservatórios e ampliações de capacidade hidráulica, conforme indicado na Figura 4.12 e na Tabela 4.1 e Tabela 4.2.

Figura 4.12 – Mapa de intervenções previstas na bacia do Canal do Mangue pelo PDMAP.



Fonte: (PDMAP, 2010)

Tabela 4.1 – Tabela de intervenções de reservação previstas pelo PDMAP para a BCM.

RESERVATÓRIOS							
SIGLA	NOME	RIO	TIPO	AREA BACIA TOTAL (Km ²)	AREA BACIA PARCIAL (Km ²)	PROFUN-DIDADE (m)	VOLUME (m ³)
RT-1	Heitor Beltrão	Rio Trapicheiros	Off-Line* Fechado	4,22	4,22	21	70.000
RT-2	Praça da Bandeira	Rio Trapicheiros	Off-Line* Fechado	0,22	0,22	28	18.000
RJ-3	Grajaú	Rio Joana	Off-Line* Aberto	3,62	3,62	8	50.000
RJ-4	Praça Niterói	Rio Joana	Off-Line* Fechado	8,68	5,06	25	75.000
RM-1	Praça Varnhagen	Rio Maracanã	Off-Line* Fechado	11,34	11,34	21	45.000
VOLUME TOTAL DOS RESERVATÓRIOS							258.000

* Reservatórios offline são reservatórios construídos fora da calha do rio, geralmente construídos em suas margens paralelamente ao curso d'água.

Fonte: Adaptado de PDMAP (2010).

Tabela 4.2 - Tabela de intervenções de canalizações previstas pelo PDMAP para a BCM.

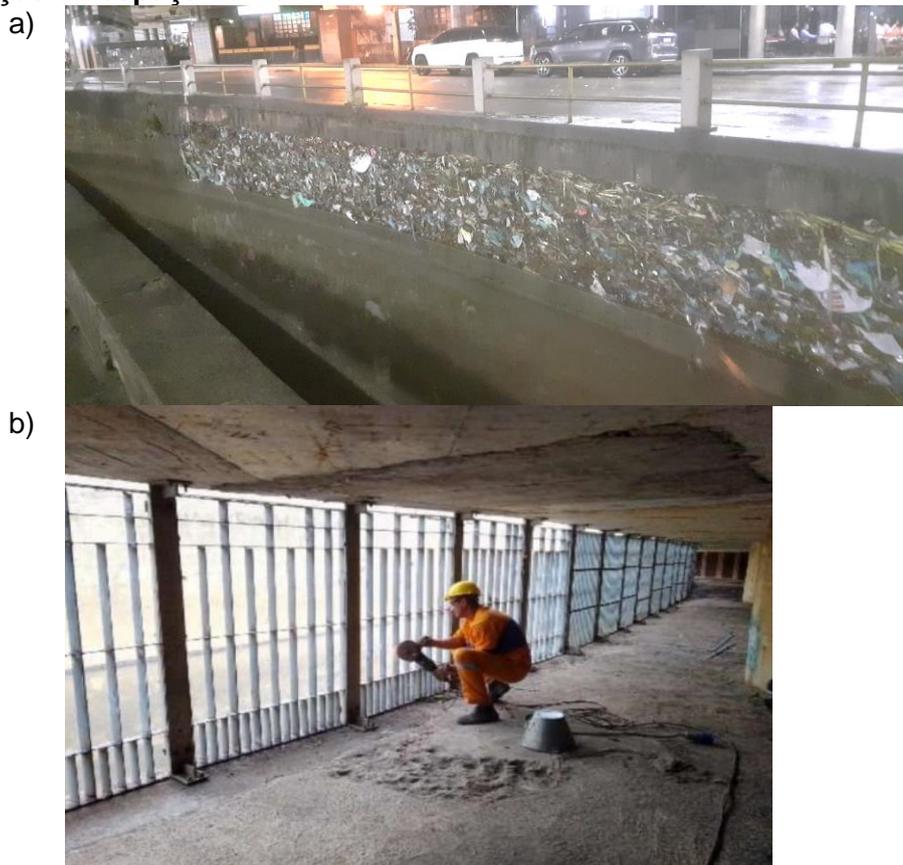
CANALIZAÇÕES					
RIO	DESCRIÇÃO	SEÇÃO TRANSVERSAL (m²)	CAPACIDADE PROJETADA (m³/s)	TIPO	EXTENSÃO (m)
Rio Joana	Entre a Praça Pres. Emilio Garrastazu Médici e a Baía de Guanabara, em túnel sob a Quinta da Boa Vista e Canal ao longo da Rua São Cristóvão	38	100	Desvio	3.400
Rio Joana	Entre a Rua Felipe Camarão e a Praça Niterói	10	33	Reforço	450
Rio Maracanã	Ao longo da Rua Felipe Camarão	8	27	Derivação	465
EXTENSÃO TOTAL DAS CANALIZAÇÕES					4.315,00

Fonte: Adaptado de PDMAP (2010).

Conforme mostrado na Figura 4.8, foram implantados os reservatórios da Praça da Bandeira (RT-2), Praça Niterói (RJ-4), Praça Varnhagen (RM-1) e o túnel de desvio do Rio Joana.

Os reservatórios e o desvio do Rio Joana impactaram positivamente na mitigação das cheias, reduzindo suas magnitudes e frequências. Todavia, ainda há problemas estruturais que necessitam de ajustes. Um desses problemas era o espaçamento muito reduzido do gradeamento da estrutura de entrada do reservatório da Praça Varnhagen, causando obstrução com facilidade, impossibilitando o enchimento completo do reservatório, conforme mostrado na Figura 4.13. Seu espaçamento foi aumentado em 2023 para facilitar a entrada de água. Outro ponto é a cota de vertimento das estruturas de entrada, principalmente do reservatório da Praça Niterói, pois o reservatório entra em operação em precipitações baixas, gerando custo operacional e redução do desempenho no abatimento na vazão de pico. Apesar dos problemas (que demanda ajustes), é notória a correção da implantação de estruturas de armazenamento e a consequente redução dos alagamentos, principalmente na Praça da Bandeira.

Figura 4.13 – a) Gradeamento da estrutura de entrada do reservatório da Praça Varnhagen obstruído. b) Serviço de corte de barras do gradeamento para ampliação do espaçamento.



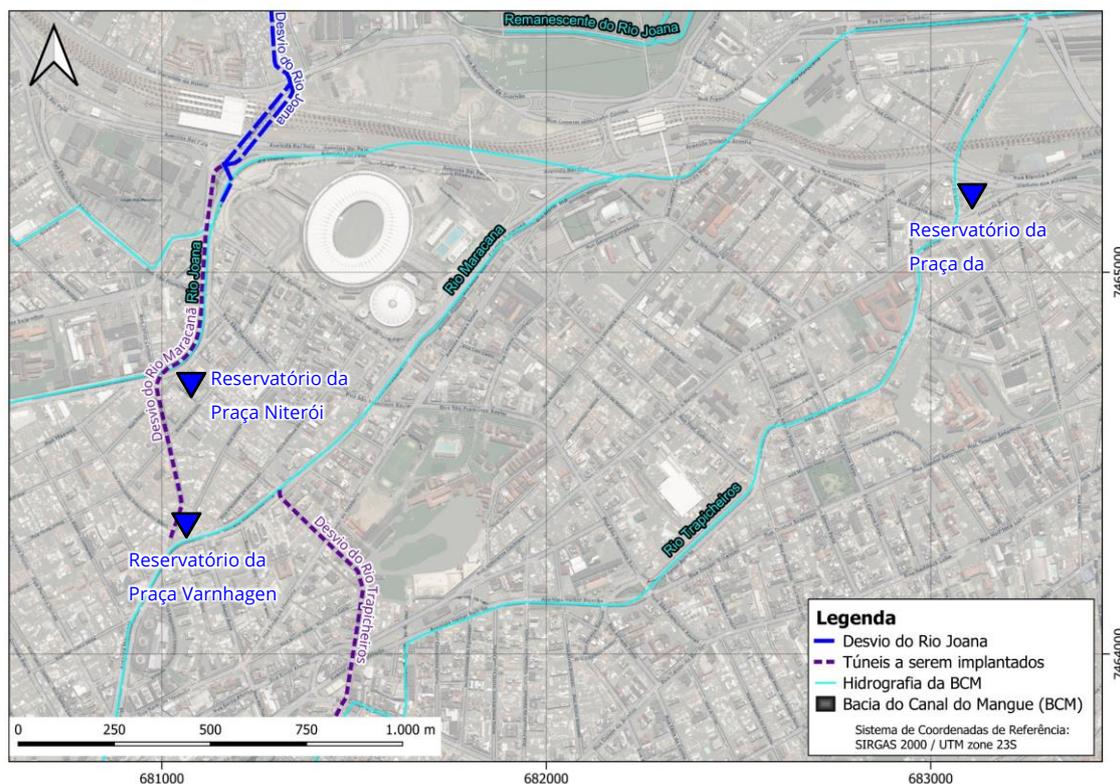
Fonte: Acervo da Fundação Rio-Águas.

Atualmente, o plano previsto para a BCM pelo PDMAP está passando por revisões. Por meio de contrato com empresa de consultoria, a Fundação Rio-Águas elaborou o projeto executivo de um túnel de desvio do Rio Maracanã a partir da estrutura de entrada do reservatório da Praça Varnhagen. O túnel com cerca de 1 Km de extensão está previsto de ser implantado pelo método não-destrutivo *New Austrian Tunneling Method* (NATM) desaguando até o desvio do Rio Joana. Além do desvio do Rio Maracanã, está sendo estudada a implantação do desvio do Rio Trapicheiros por meio de galeria retangular de 720 metros de extensão desaguando no Rio Maracanã, conforme Figura 4.14.

O objetivo do desvio do Rio Maracanã é otimizar a operação do reservatório da Praça Varnhagen, priorizando o escoamento pelo desvio do rio, e aprimorar o abatimento das vazões de pico do rio. O sistema será manobrado por sistemas de comportas, onde o reservatório irá operar quando o desvio estiver sobrecarregado, mantendo sua velocidade de escoamento dentro das máximas

admissíveis. O sistema completo terá a capacidade de reduzir em 75% o volume de um evento de chuva de tempo de recorrência de 25 anos.

Figura 4.14 - Principais alternativas de controle de cheias a serem implantadas e implantadas na BCM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5. CARACTERIZAÇÃO SOCIOECONÔMICA

Com o processo histórico de urbanização nas regiões mais planas, os grandes centros econômicos se estabeleceram nessas áreas, atraindo a população de maior poder aquisitivo, o que levou a população de maior vulnerabilidade social a ocupar as encostas (Rezende, 2018). Assim, as áreas planas deram espaço para os grandes edifícios, onde a densidade demográfica é elevada, conforme pode ser visto na Figura 4.15. É possível observar também, na mesma figura, altas densidades em áreas informais, como os Morros dos Macacos e de São Carlos.

Figura 4.16 – As três dimensões do IPS adaptado pelo IPP.

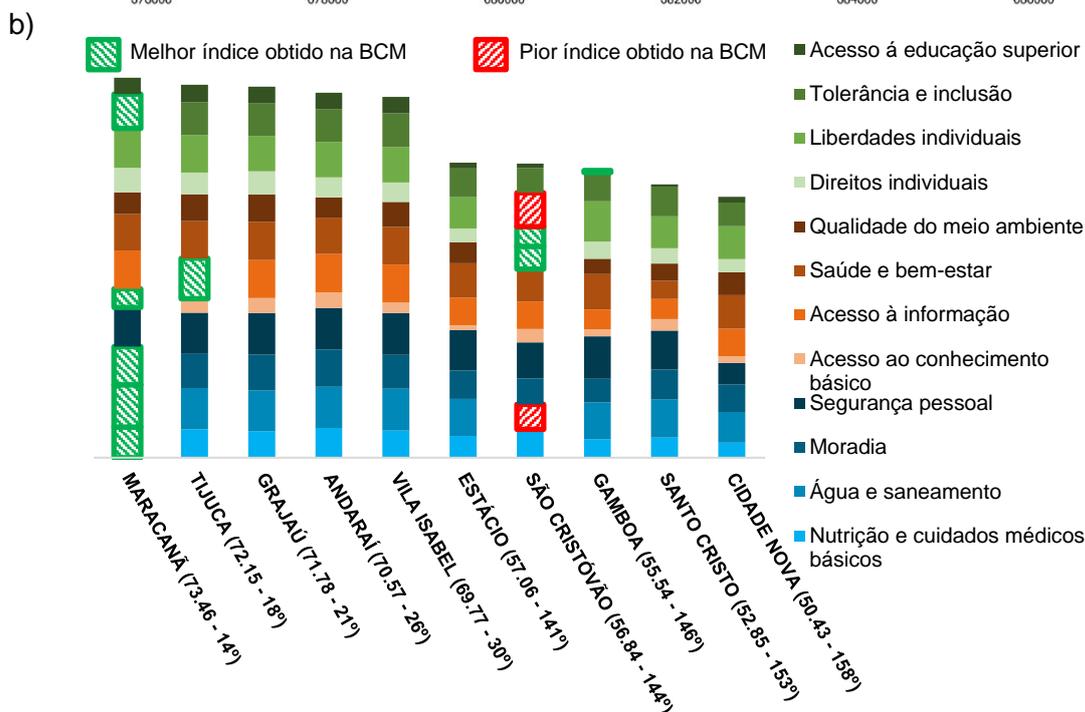
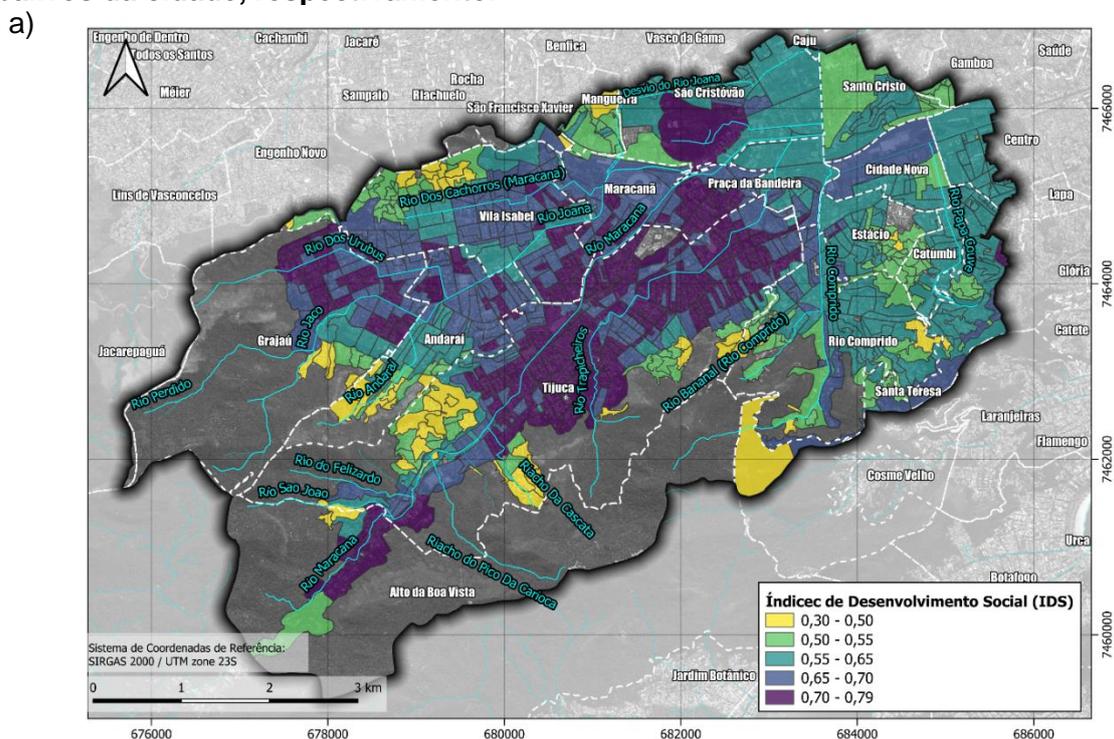


Fonte: (Instituto Pereira Passos, 2022)

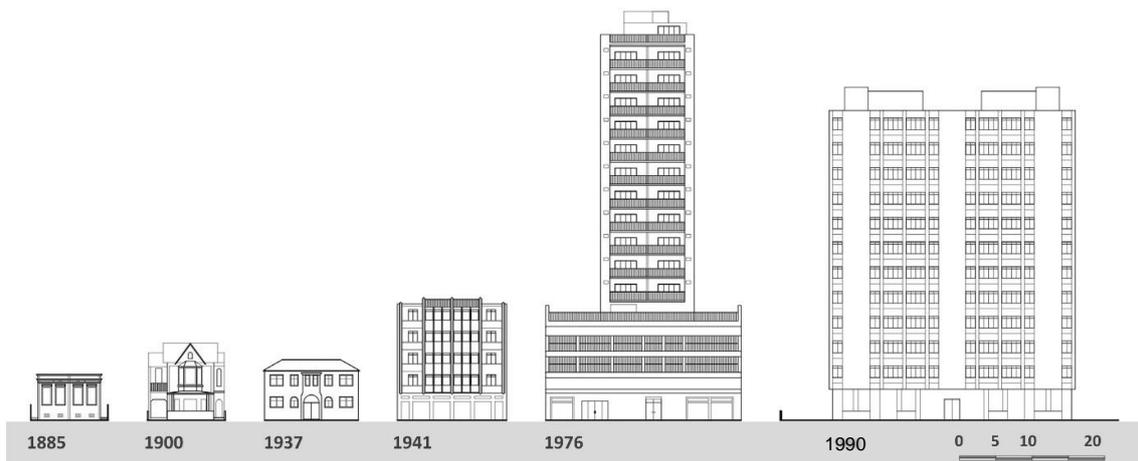
Observando os resultados do IPS, referente ao ano de 2022, para a Bacia do Canal do Mangue, apresentados na Figura 4.17, identifica-se que o bairro com melhores índices foi o Maracanã, com os índices de Nutrição e cuidados médicos, Água e saneamento, Moradia, Acesso ao conhecimento básico, e Tolerância e inclusão em 14º lugar no ranking de toda cidade. Já a Cidade Nova obteve o pior resultado, devido à elevada presença de áreas informais e maior ocupação comercial, ficando em 158º lugar.

Em relação à renda média, foi elaborado um mapa com base no censo de 2010 (IBGE, 2012) e nas classes econômicas da Associação Brasileira de Empresas e Pesquisa – ABEP (2022) conforme apresentado na Figura 4.18. É possível observar a predominância de classes econômicas inferiores nas encostas e a classe B2 predominante nas regiões mais planas. Já em relação à densidade demográfica, as regiões mais densas encontram-se em locais predominantemente residenciais.

Figura 4.17 – a) Mapa de resultados do IPS por setores censitários do censo de 2010 para a Bacia do Canal do Mangue. b) Gráfico de barras empilhadas dos 5 melhores e 5 piores bairros com resultados de IPS de 2022 para a BCM. Os resultados em parênteses são referentes ao IDS e o ranking relativo a todos os bairros da cidade, respectivamente.



Fonte: Adaptado de (Instituto Pereira Passos, 2022)



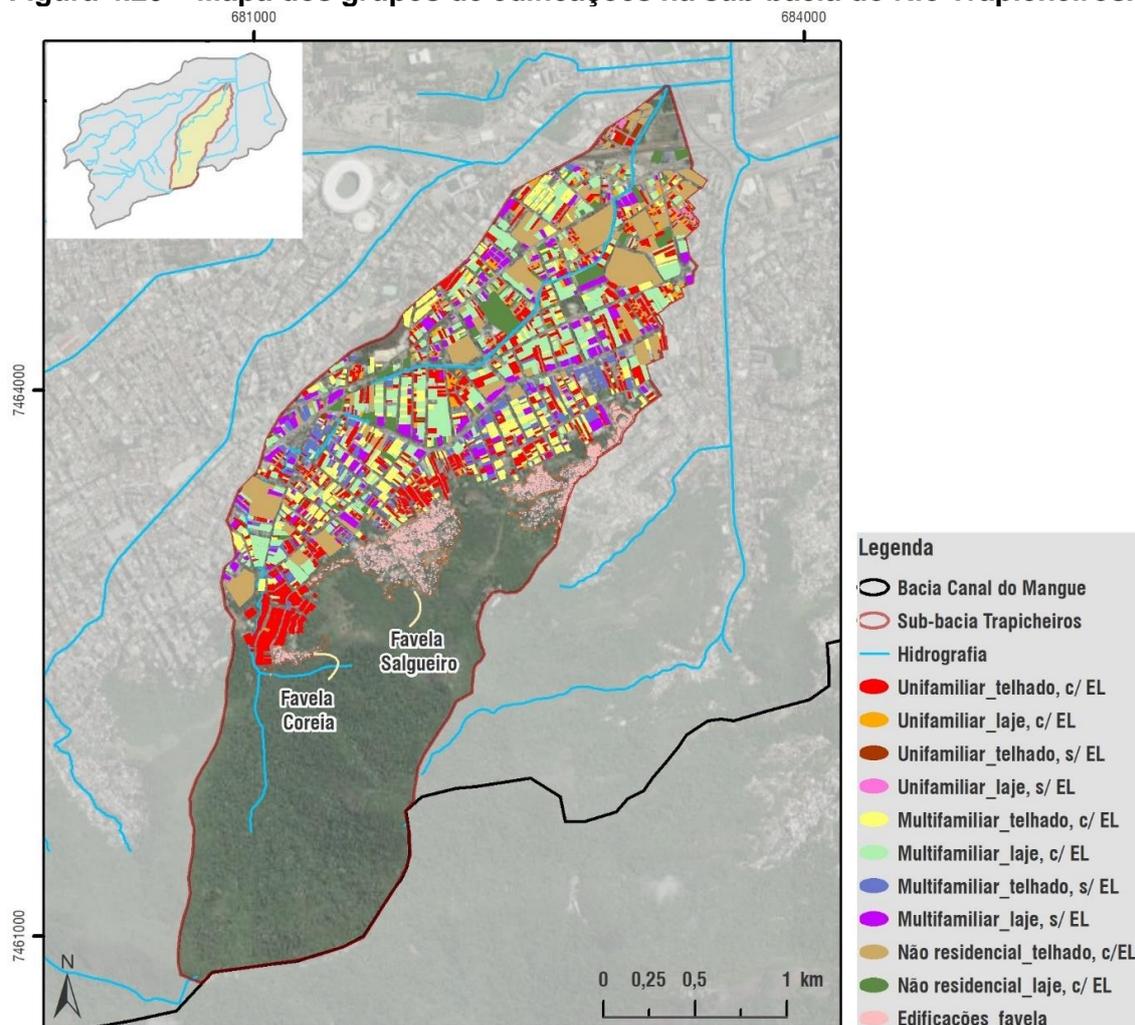
Fonte: OKUMURA (2022)

As descrições das seis tipologias identificadas por OKUMURA (2022) estão elencadas abaixo, correlacionadas com o ano de sua implantação:

- 1885 – Habitação com um pavimento e porão, construída no alinhamento;
- 1900 – Sobrado construído em rua com largura superior a 5 metros;
- 1937 – Prédio com dois pavimentos construído em região enquadrada como ZR-2;
- 1941 – Edificação com cinco pavimentos localizada na ZR-1;
- 1976 – Edifício sobre embasamento com pavimentos de garagem, de uso comum.
- 1990 – Edificação afastada das divisas.

Em seu levantamento das tipologias arquitetônicas, Okumura (2022) também mapeou as tipologias da sub-bacia do Rio Trapicheiros quanto ao uso, tipo de cobertura e presença de espaços livres, conforme é apresentado na Figura 4.20 e na Tabela 4.3. Tais parâmetros são fundamentais na definição da disponibilidade de espaço e estrutura para aplicação de soluções sustentáveis de drenagem.

Figura 4.20 – Mapa dos grupos de edificações na sub-bacia do Rio Trapicheiros.



Fonte: (Okumura, 2022)

Tabela 4.3 - Levantamento dos grupos de edificações por uso, tipo de cobertura e presença de espaços livres na sub-bacia do Rio Trapicheiros.

Uso	Tipo de Cobertura	Espaço livre privado	Qt	%	% Uso
Residencial unifamiliar	Telhado	Sim	1.851	41%	55%
	Laje	Sim	381	8%	
	Telhado	Não	176	4%	
	Laje	Não	63	1%	
Residencial multifamiliar	Telhado	Sim	625	14%	40%
	Laje	Sim	661	15%	
	Telhado	Não	263	6%	
	Laje	Não	267	6%	
Não residencial	Telhado	Sim	164	4%	5%
	Laje	Sim	54	1%	

Fonte: Adaptado de Okumura (2022).

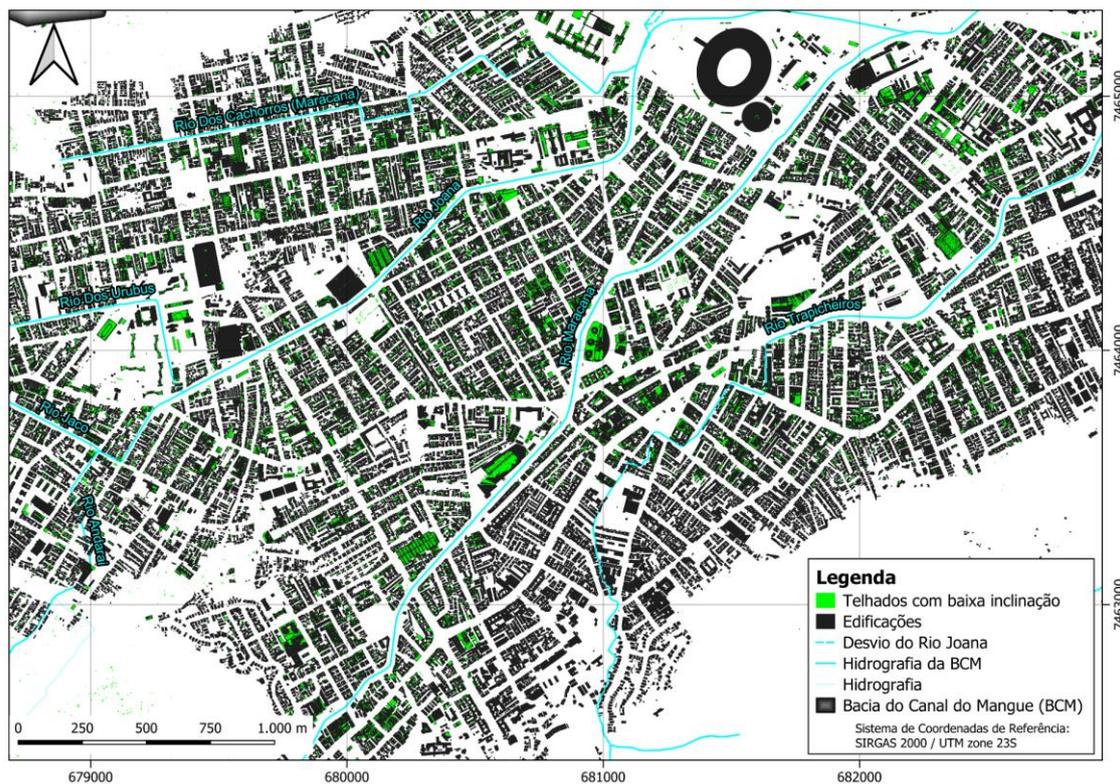
4.7. POTENCIAIS DE USO DE SISTEMA DE DRENAGEM SUSTENTÁVEIS

A seguir são apresentados dois recortes para a BCM de estudos referentes ao potencial aproveitamento de água de chuva e implantação de telhados verdes para a cidade do Rio de Janeiro; características relevantes para a metodologia proposta.

Dang e Sampaio (2020) analisaram o potencial uso agrícola em telhados verdes para a cidade do Rio de Janeiro. O primeiro passo do trabalho consistiu em delimitar os telhados com inclinações inferiores à 5°, com base nas informações de modelo digital de superfície gerado pela tecnologia *Light Detection and Ranging* (LIDAR) disponibilizado pelo Instituto Pereira Passos de levantamento aéreo de 2013, que capturou cerca de 69% da área total do município.

Telhados com inclinações inferiores à 5° tem potencial de implantação de telhados verdes intensivos (Razzaghmanesh; Beecham; Brien, 2014). Com base nos dados do estudo disponibilizados no Data.Rio (Instituto Pereira Passos, 2020), a BCM tem apenas 5,57 % de área de telhado com inclinação inferior à 5°, conforme Figura 4.21. Logo, a BCM é mais propensa à aplicação de telhados verdes extensivos, mais adequados para inclinações superiores.

Figura 4.21 - Telhados com inclinação inferior a 5° na região central da BCM.



Fonte: Adaptado de Instituto Pereira Passos, (2020).

Em relação ao aproveitamento de água da chuva, Ribeiro (2016) avaliou seu potencial para a cidade do Rio de Janeiro. A metodologia consistiu em: (1) interpolação da malha pluviométrica do município do Rio de Janeiro; (2) cálculo das áreas de captação (coberturas de edificações) e do volume de água coletável por setor censitário; (3) elaboração de perfil do consumo residencial, diferenciando o uso potável do não potável; e (4) cruzamento da pluviosidade com a área de captação do setor censitário (volume coletável), calculando o potencial de abastecimento por água de chuva baseado no consumo da população do censo de 2010.

Figura 4.22 – Fluxograma aplicada para avaliação do potencial de aproveitamento de água de chuva.

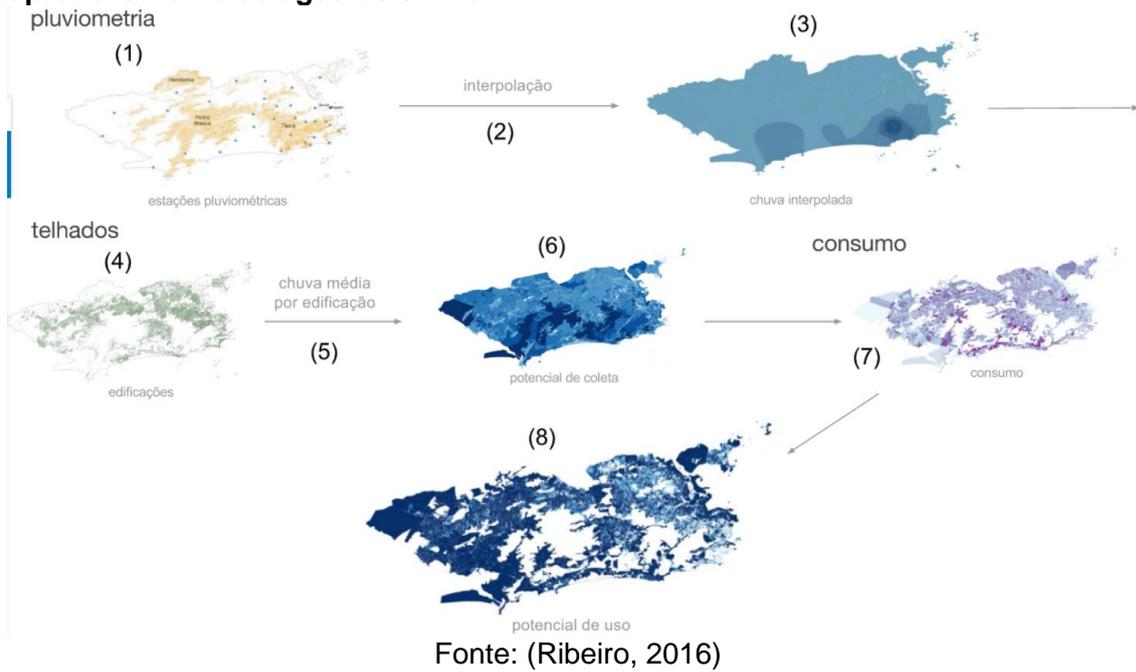
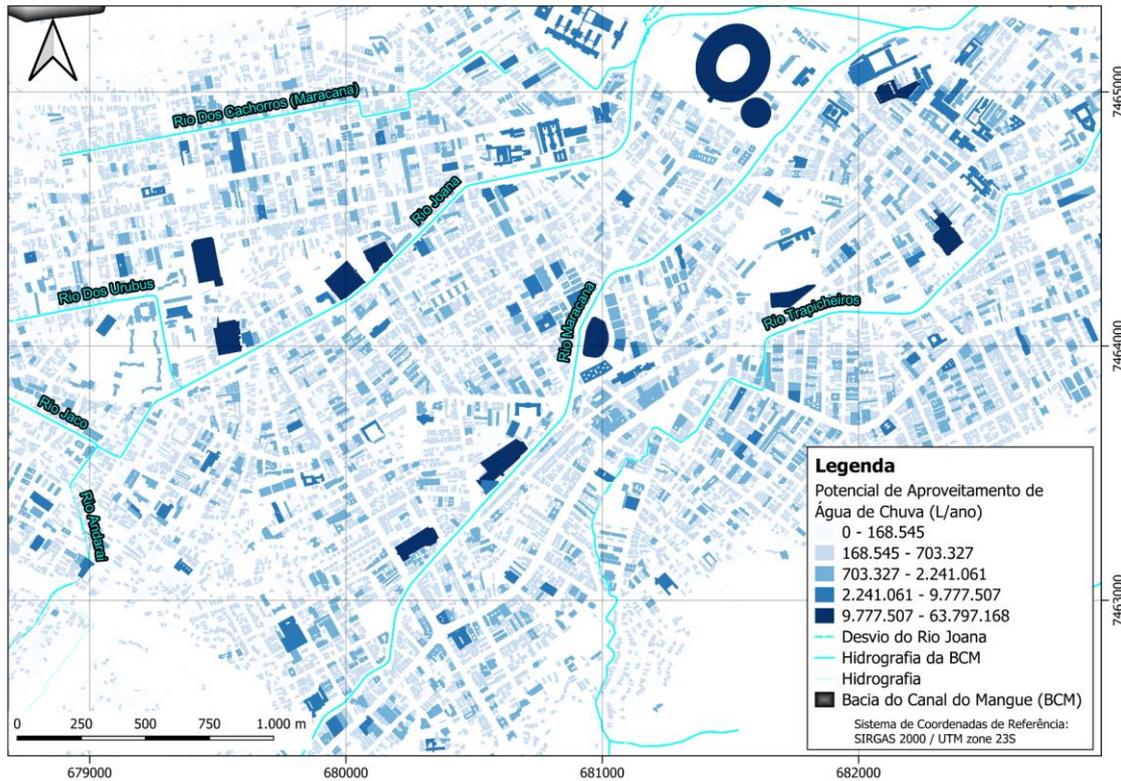


Figura 4.23 - Mapa de potencial de aproveitamento de água de chuva para a região central da BCM.

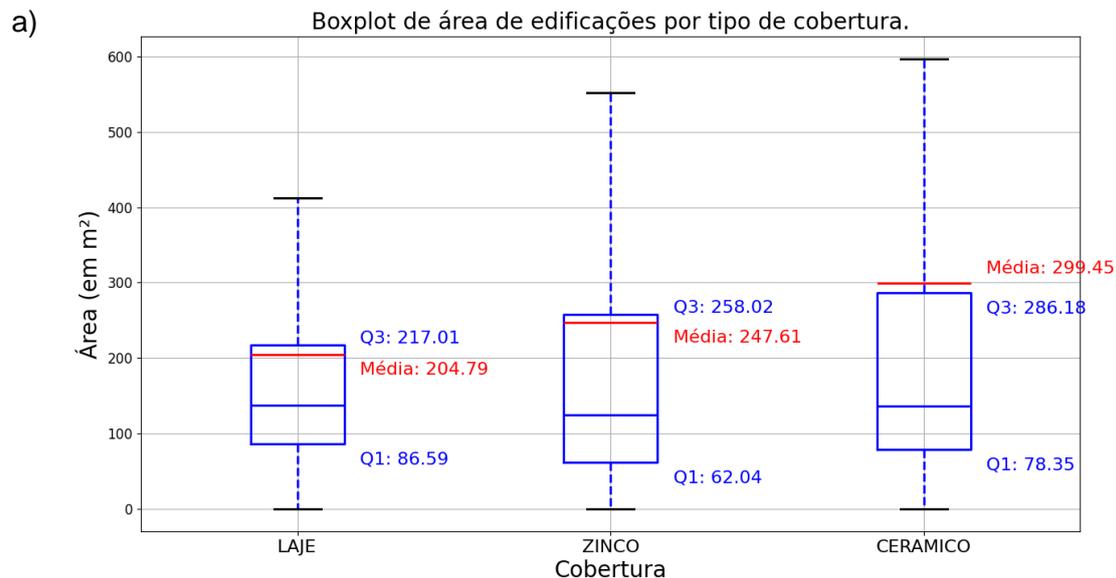


Fonte: Elaborado pelo autor baseado nos dados do Data.Rio (Instituto Pereira Passos, 2020)

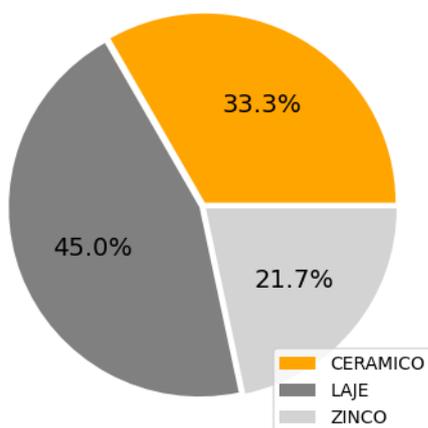
Muitas edificações atuais não foram contabilizadas pelo fato de os polígonos de edificações terem sido obtidos a partir da restituição aerofotogramétrica de 2013, havendo uma defasagem com a situação atual. Além disso, como foi usada a ortofoto de 2019, algumas edificações que deixaram de existir foram contabilizadas com tipos de telhados atuais, como visto na Figura 5.2 abaixo do rótulo “Rua Gonçalves Crespo”. Houveram telhados de tipo zinco de edificações mais atuais que poderiam ser contabilizados como do tipo laje. Todavia, de modo conservador, os telhados verdes foram considerados apenas em telhados do tipo laje.

Com o objetivo de descrever a distribuição das áreas das edificações para cada tipo de cobertura, foi elaborado um gráfico de caixa e um de pizza conforme Figura 5.4. Para melhor visualização, os outliers foram retirados dos gráficos de caixa. O telhado do tipo laje obteve maior percentual de área em relação à área total das edificações, correspondendo a 45%, apesar das áreas das edificações serem menores. Esse fato ocorre por ser o tipo de telhado mais numeroso entre as edificações, correspondendo à 44% da quantidade de edificações. As edificações com telhados cerâmicos são as edificações de maiores áreas.

Figura 5.4 – a) Gráfico de caixa para as áreas de edificações e tipo de cobertura para a Bacia do Canal do Mangue. b) Gráfico de pizza do total da área por tipo de cobertura.



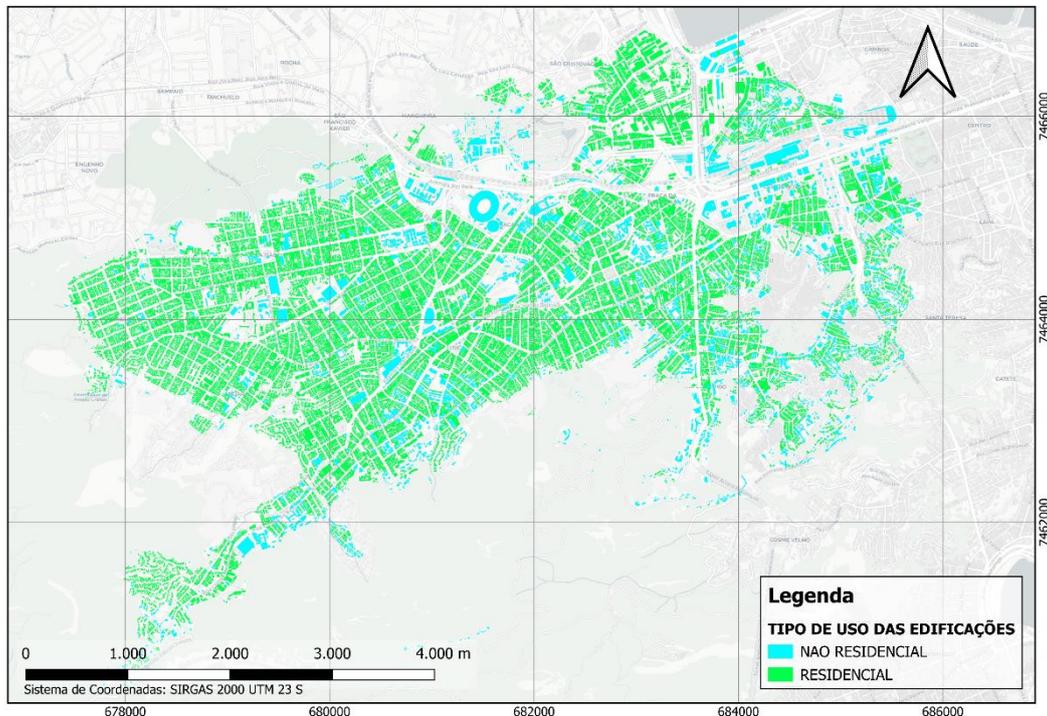
b)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os tipos de uso das edificações foram obtidos por análise de sobreposição com informações georreferenciadas de estabelecimento de educação, saúde, religiosos e posições de supermercados. Após esse pré-tratamento, muitas edificações foram classificadas manualmente. Os resultados da classificação por tipo de uso podem ser observados na Figura 5.5.

Figura 5.5 - Mapa de edificações por tipo de uso residencial e não residencial da bacia do Canal do Mangue.



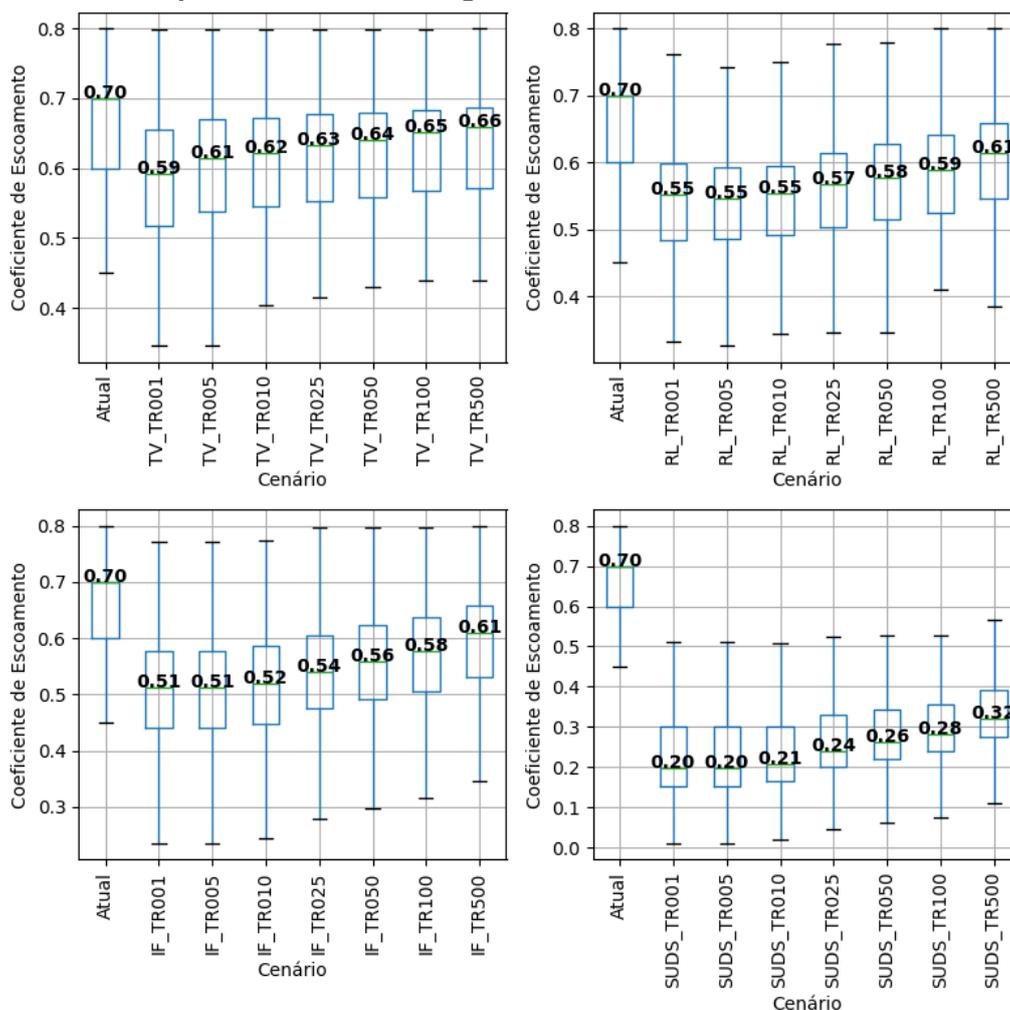
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2. MODELO HIDROLÓGICO

O modelo hidrológico baseado em reservatórios foi aplicado para cada cenário conforme metodologia. Para SDUS, os reservatórios de telhado verde, reservatório de lote e jardim de chuva foram considerados em cascata. As vazões excedentes do telhado verde foram lançadas no reservatório de lote e as vazões de saída do reservatório de lote foram somadas aos volumes de chuva dos jardins de chuva.

Foram calculados os coeficientes de escoamento superficiais equivalentes de cada célula com a divisão da soma do volume de chuva efetivo sobre a soma do volume de chuva precipitado. Os resultados para as células que foram modificadas pelo modelo hidrológico encontram-se na Figura 5.6.

Figura 5.6 - Gráfico de caixa dos resultados de coeficiente de escoamento das células tratadas pelo modelo hidrológico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados da Figura 5.6 mostraram uma eficiência reduzida do telhado verde, tal fato pode ser explicado pela capacidade de 35 mm/m² de ecotelhado considerado e a restrição de sua implantação em telhados do tipo laje.

Já sobre os reservatórios de lote, as reduções dos coeficientes de escoamento foram maiores do que o telhado verde, sendo sua capacidade resultante calculada de 51 mm/m². Observa-se que o cenário vai perdendo eficiência a partir do tempo de recorrência de 10 anos.

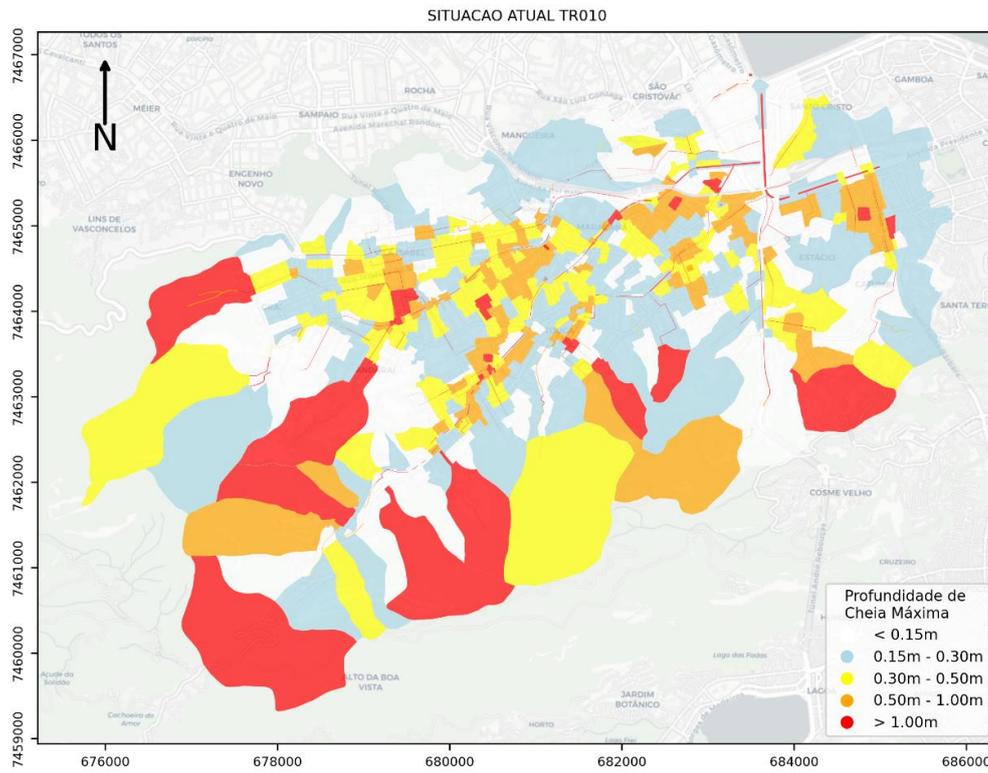
As medidas de infiltração tiveram rendimento similar ao reservatório de lote, porém com melhor desempenho em tempos de recorrência mais reduzidos, perdendo eficiência a partir do tempo de recorrência de 5 anos. Tal fato deve ser explicado pelo orifício de fundo dos reservatórios de lote, considerando com diâmetro de 25 mm; permitindo o escoamento do volume em tempo de recorrências menores que poderiam ser abatidos se o diâmetro fosse mais reduzido.

Já os cenários SDUS com as medidas em cascata obteve resultados superiores, igualando os coeficientes de escoamento das células urbanizadas ao equivalente ao período de pré-dimensionamento. O cenário começa a perder eficiência a partir do tempo de recorrência de 25 anos, porém com elevado desempenho mesmo para tempos de recorrência elevados.

5.3. MODELAGEM HIDRODINÂMICA – MODCEL

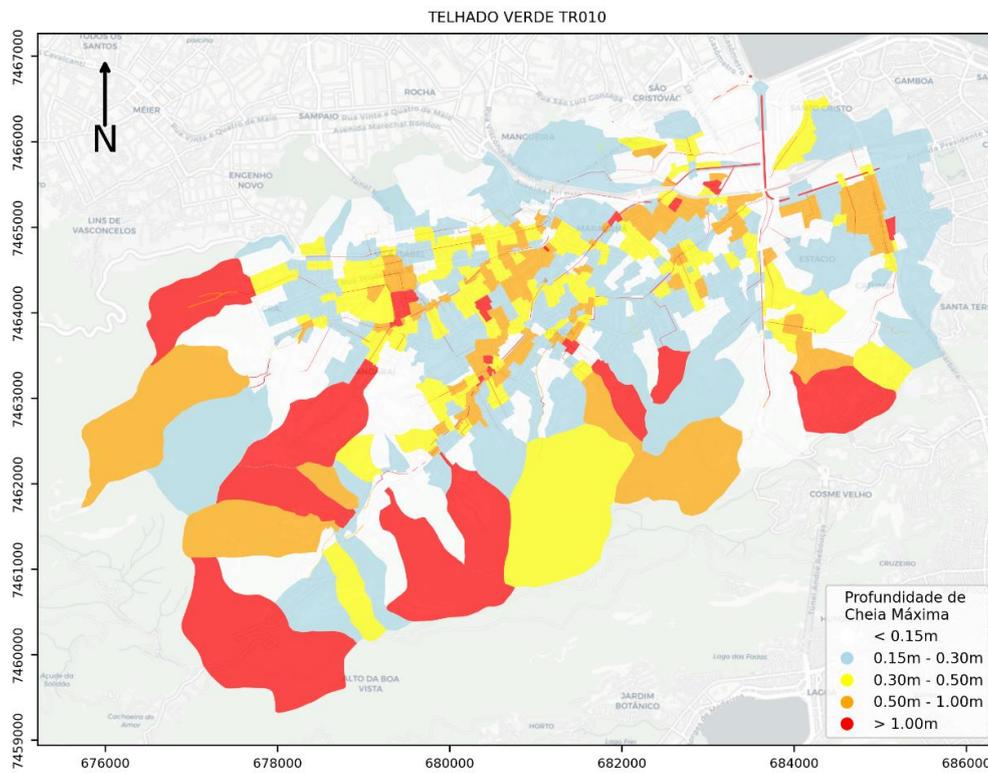
Com o objetivo de construir as curvas de prejuízo-probabilidade, foram simulados 35 cenários de modelagem ao todo. A seguir serão apresentados os mapas de inundação dos cenários para os tempos de recorrência de 10 e 25 anos, preconizados como eventos de projeto para sistemas de microdrenagem e macrodrenagem, respectivamente. Adicionalmente, são apresentados gráficos de caixa das reduções de altura máxima de cheia obtidas na Figura 5.17. Os demais mapas podem ser visualizados no Apêndice.

Figura 5.7 - Mapa de mancha de inundação da Situação Atual para o evento de tempo de recorrência de 10 anos.



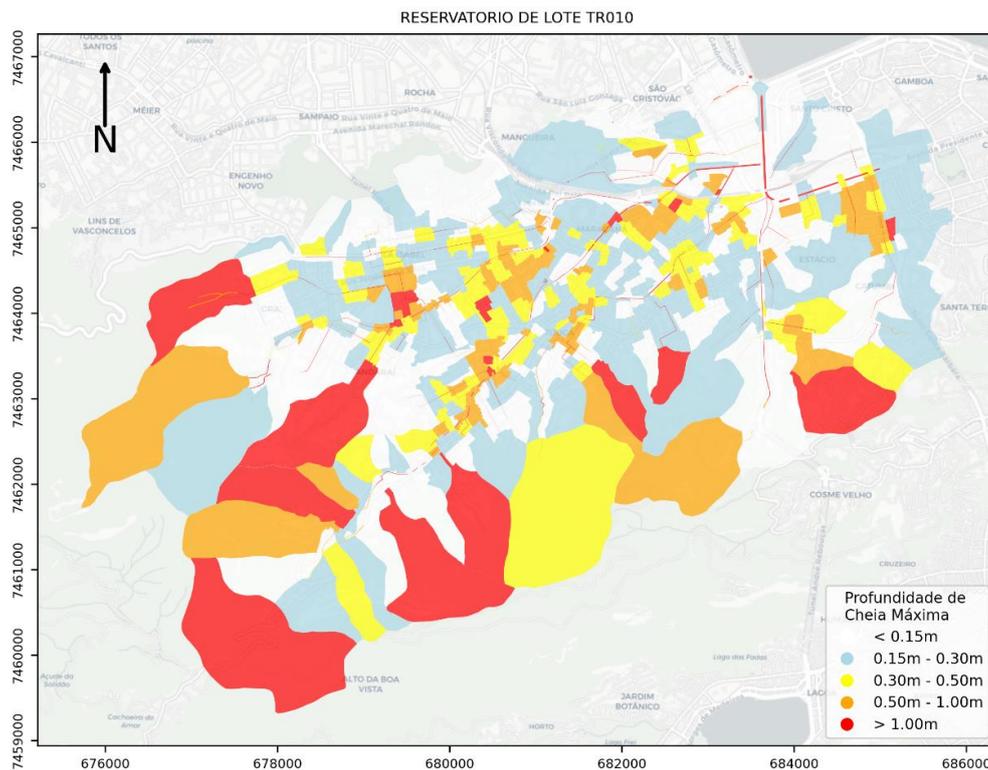
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.8 - Mapa de mancha de inundação do cenário de Telhado Verde para o evento de tempo de recorrência de 10 anos.



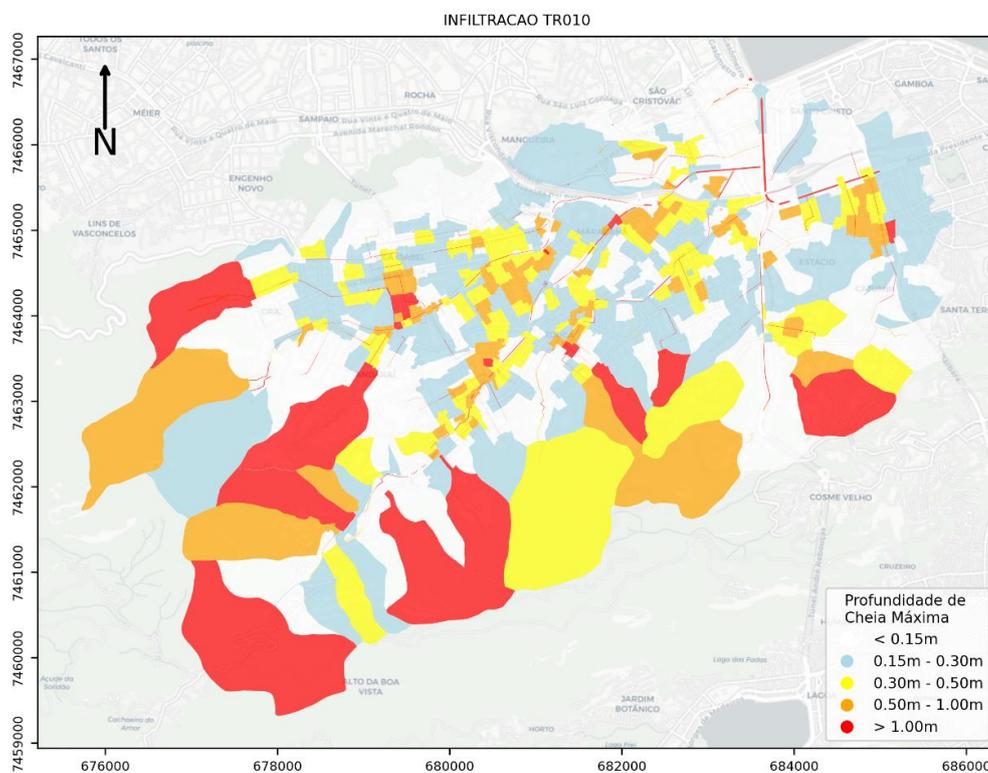
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.9 - Mapa de mancha de inundação do cenário de Reservatório de Lote para o evento de tempo de recorrência de 10 anos.



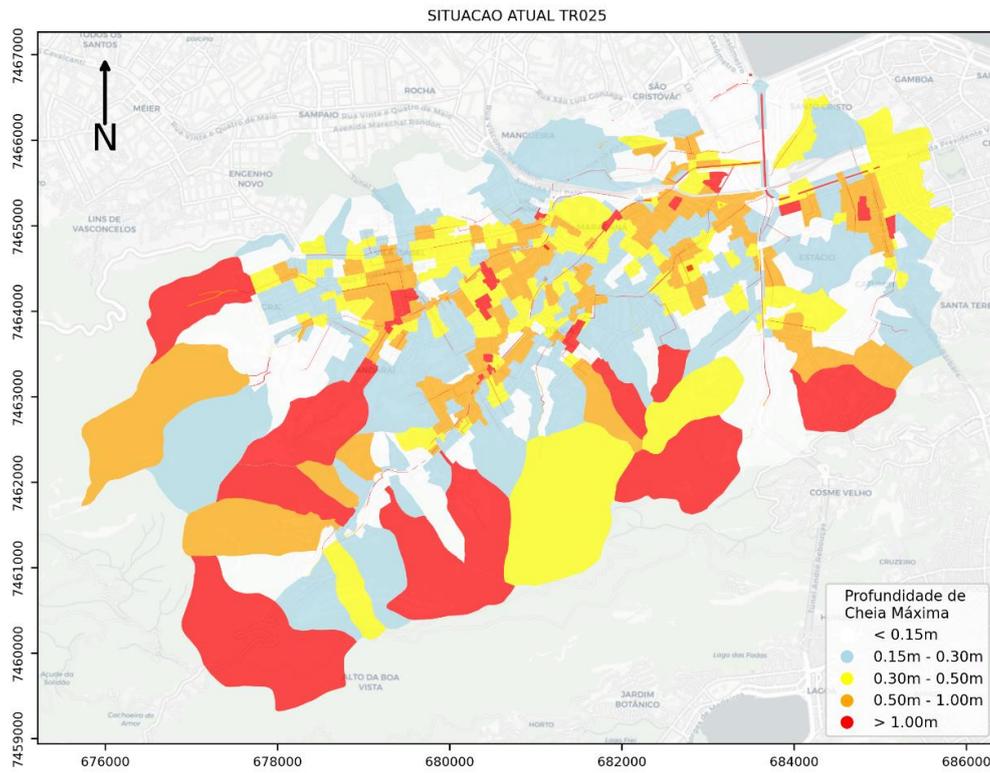
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.10 - Mapa de mancha de inundação do cenário de Infiltração para o evento de tempo de recorrência de 10 anos.



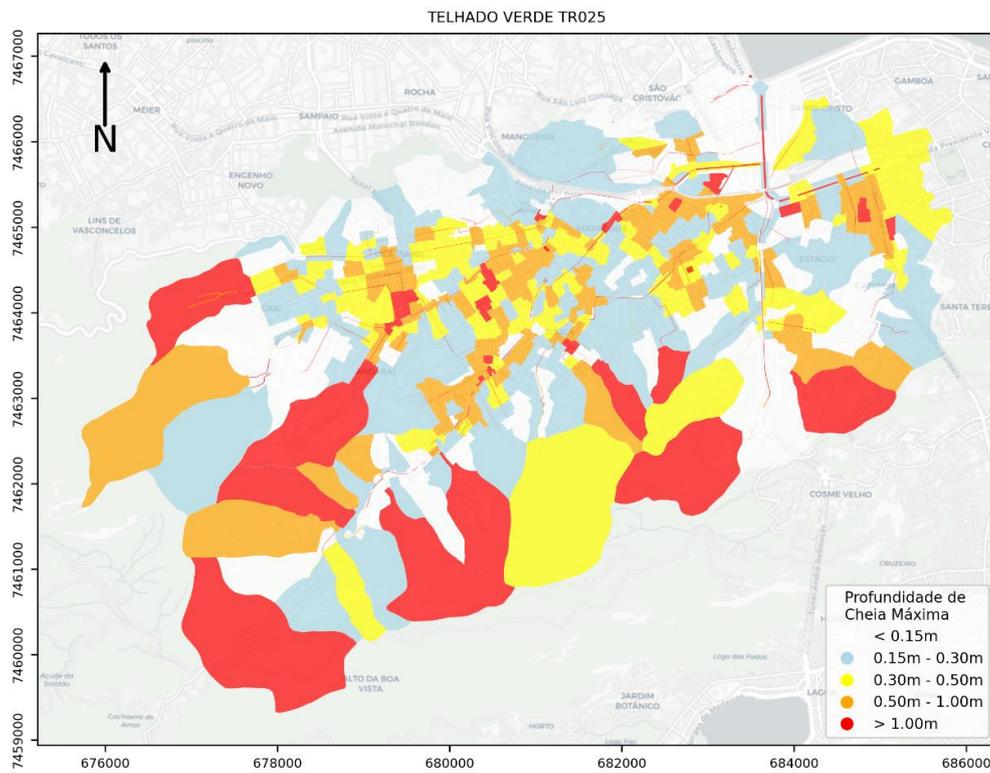
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.11 - Mapa de mancha de inundação da Situação Atual para o evento de tempo de recorrência de 25 anos.



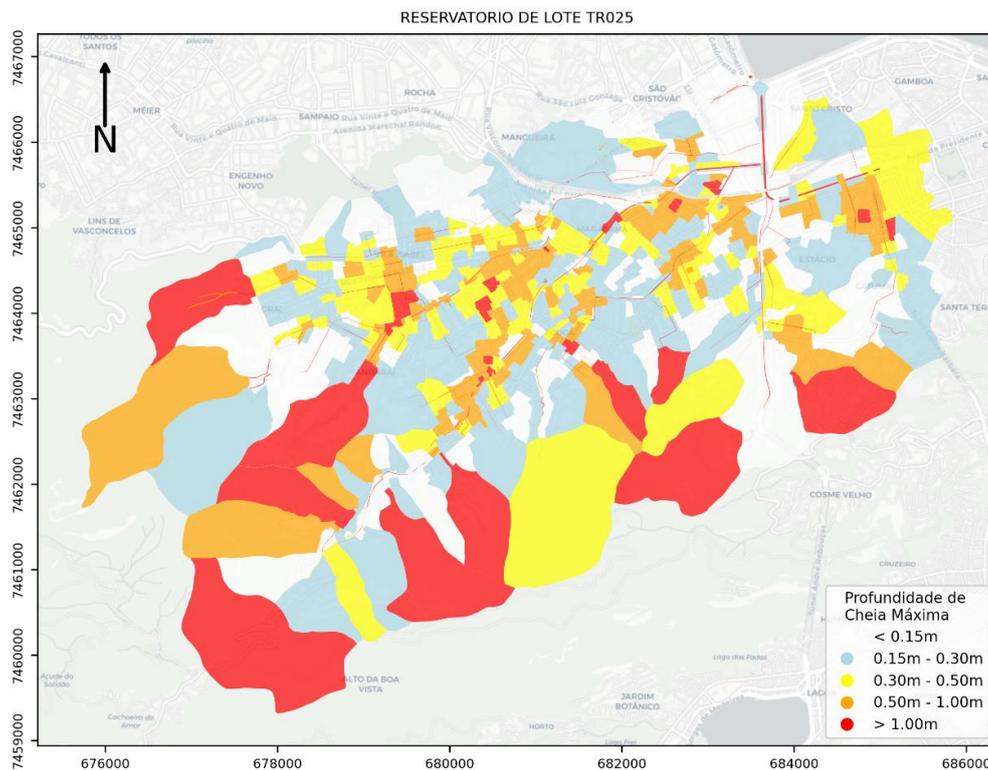
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.12 - Mapa de mancha de inundação do cenário de Telhado Verde para o evento de tempo de recorrência de 25 anos.



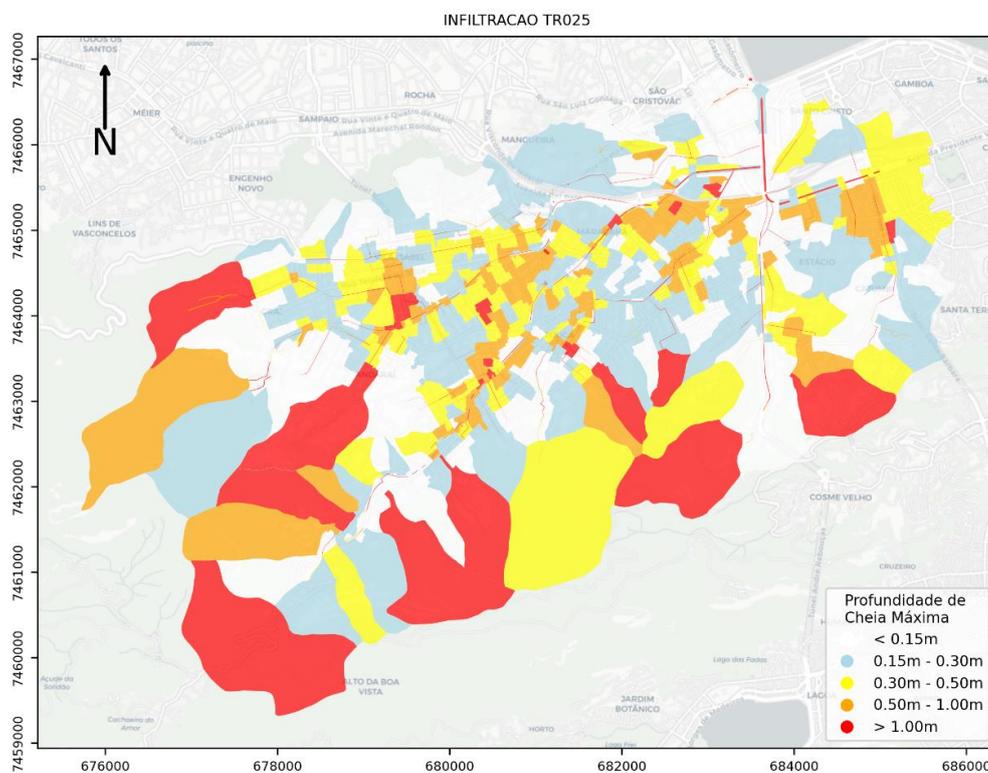
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.13 - Mapa de mancha de inundação do cenário de Reservatório de Lote para o evento de tempo de recorrência de 25 anos.



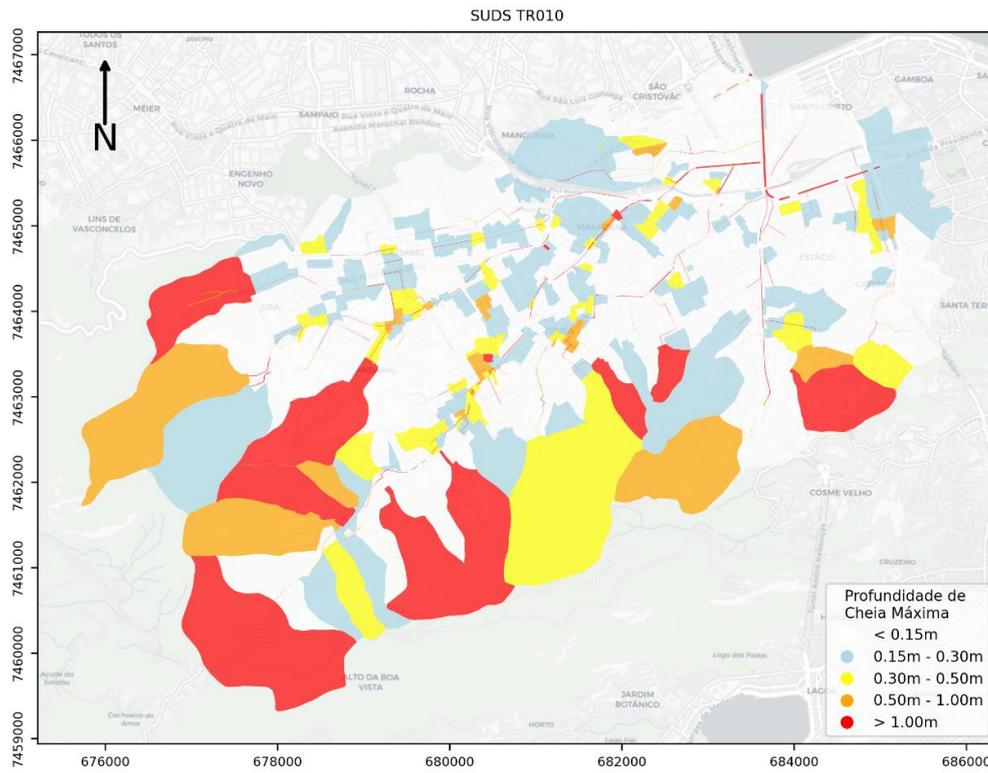
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.14 - Mapa de mancha de inundação do cenário de Infiltração para o evento de tempo de recorrência de 25 anos.



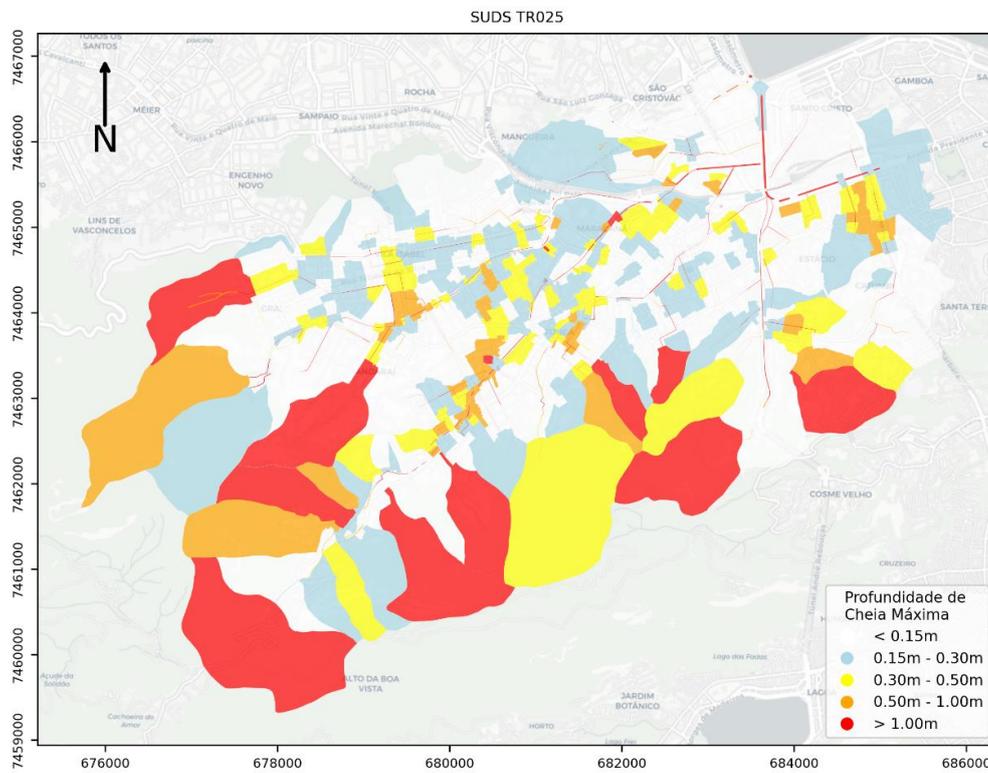
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.15 - Mapa de mancha de inundação do cenário de SDUS para o evento de tempo de recorrência de 10 anos.



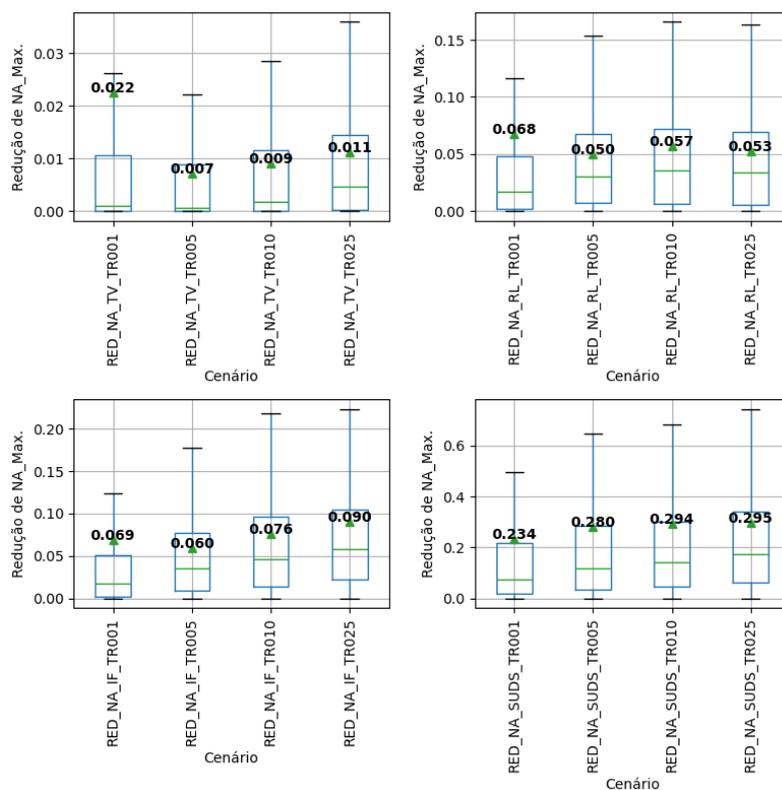
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.16 - Mapa de mancha de inundação do cenário de SDUS para o evento de tempo de recorrência de 25 anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.17 - Gráfico caixa das reduções de altura máxima de cheia das células de escoamento dos cenários.



Fonte: Elaborado pelo autor.

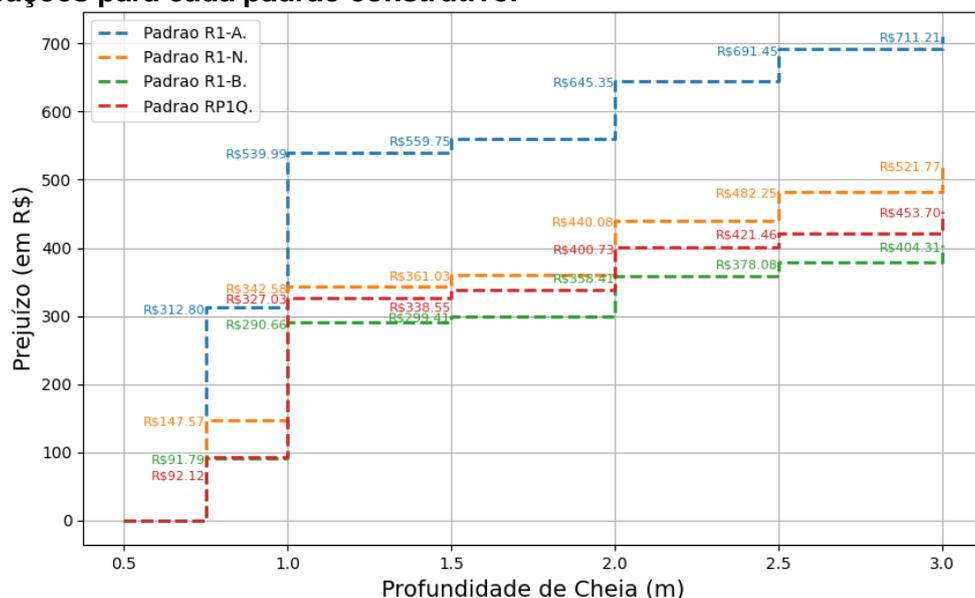
5.4. BENEFÍCIOS DO MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS

A seguir são descritos os resultados de benefícios do manejo de águas pluviais.

5.4.1. Redução do Prejuízo Anual Esperado (PAE)

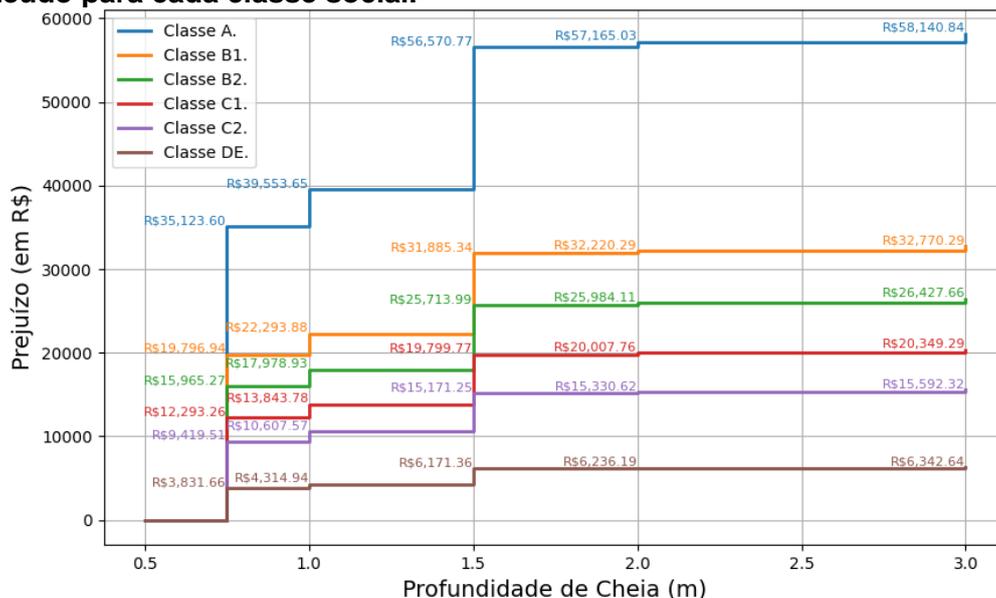
As curvas prejuízo *versus* profundidade para danos às edificações e conteúdos foram construídas conforme metodologia e estão apresentadas nas Figura 5.18 e Figura 5.19, respectivamente.

Figura 5.18 - Curva prejuízo versus profundidade de cheia para danos às edificações para cada padrão construtivo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

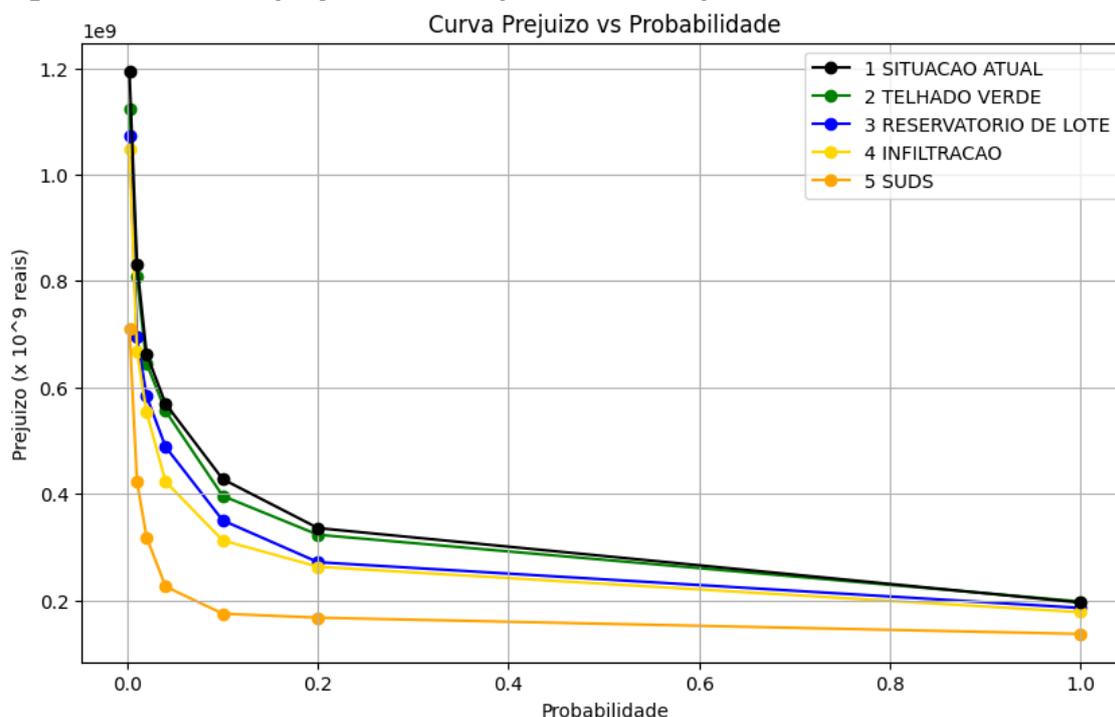
Figura 5.19 - Curva prejuízo versus profundidade de cheia para danos ao conteúdo para cada classe social.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em posse das curvas de prejuízo *versus* profundidade de cheia, foram obtidas as áreas de edificações atingidas pela cheia para cada célula, considerando a profundidade de cheia superior a 0.50 metro. Com a renda média de cada célula e definida sua classe social representativa, foram aplicadas as Equações 3.3 e 3.4 para o cálculo do prejuízo de cada célula e depois somados para obter o valor do cenário. O processo foi aplicado para todos os cinco cenários e para os tempos de recorrência de 1, 5, 10, 25, 50, 100 e 500 anos, obtendo as curvas apresentadas na Figura 5.20.

Figura 5.20 - Curva prejuízo versus probabilidade para os cenários.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os prejuízos anuais esperados (PAE) para cada cenário foram calculados pela integração numérica das curvas prejuízos-probabilidade e as reduções foram as diferenças com os resultados da situação atual.

Tabela 5.1 - Resultados de redução de prejuízo anual esperado associado às cheias urbanas para os cenários.

CENÁRIO	REDUÇÃO PREJUÍZO ANUAL ESPERADO VALOR GLOBAL
Telhado Verde	R\$ 41.392.750,67
Reservatório de Lote	R\$ 121.117.651,81
Infiltração	R\$ 150.022.866,27
SDUS	R\$ 423.899.242,91

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.2. Valorização Imobiliária

A seguir são demonstrados os resultados obtidos na obtenção da valorização imobiliária para os cenários.

5.4.2.1. Descrição dos dados

Os dados de referência de valores imobiliário utilizado foram originados da planta genérica de valores, extraída do anexo da Lei 6.250 de 28/09/2017 (Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, 2017) e georreferenciada com base no shapefile

de número de portas desenvolvido pelo Instituto Pereira Passos. Os valores são definidos por trechos de logradouros, delimitados pela sua numeração ímpar e par e contém as seguintes tipologias:

- Vap - Valor Unitário Padrão Apartamento: aos imóveis com tipologias “Apartamento”, “Apart-hotel” e “Especial”, os dois últimos desde que com utilização “Residencial”
- Vca - Valor Unitário Padrão Casa: aos imóveis com tipologia “Casa”;
- Vlj - Valor Unitário Padrão Loja: aos imóveis com tipologia “Loja” e demais tipologias não abrangidas pelos três outros parâmetros prediais (Vap, Vca e Vsc);
- Vsc - Valor Unitário Padrão Sala Comercial: aos imóveis com tipologia “Sala”;
- Vo - Valor Unitário Padrão Territorial: aos imóveis com tributação territorial e predial com área excedente.

Os valores padrões unitários são valores de base para o cálculo do valor venal dos imóveis, calculada pela Equação 5.1 (Prefeitura do Rio de Janeiro, 2023).

$$VV = A \cdot T \cdot I \cdot P \cdot V_u \quad (5.1)$$

Onde:

VV Valor Venal, em R\$;

A Área edificada do imóvel, em m²;

T Fator Tipologia;

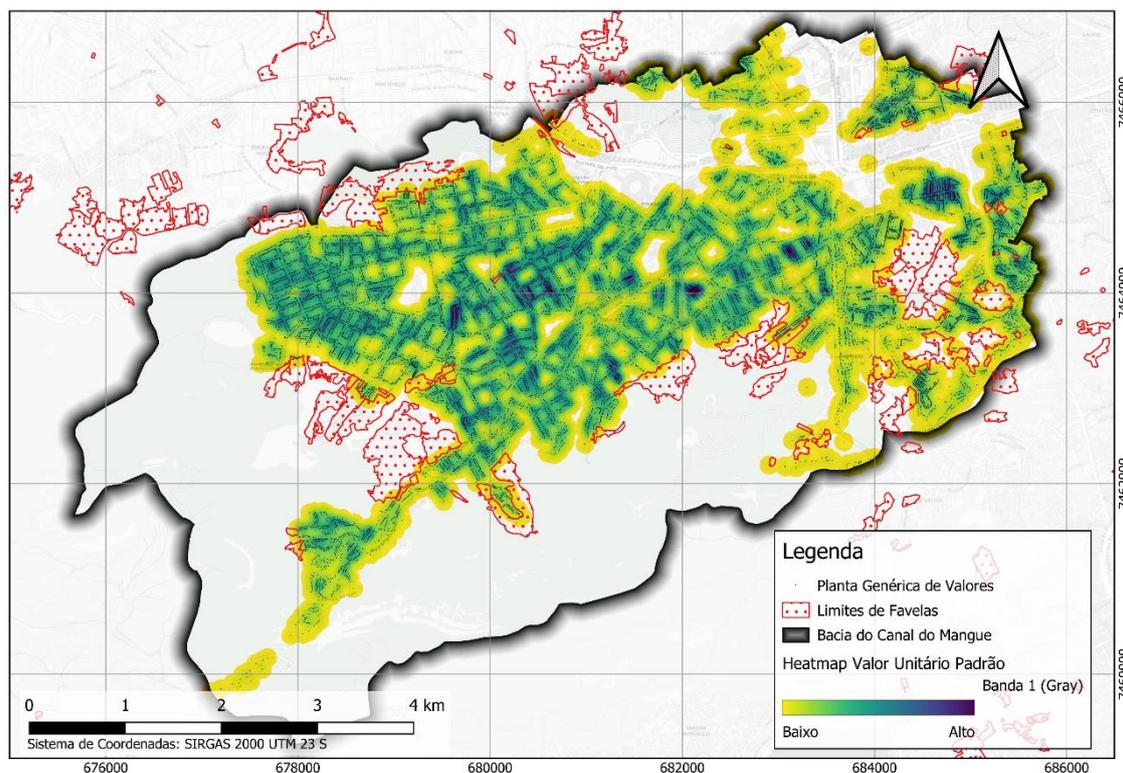
I Fator Idade;

P Fator Posição (localização do imóvel em relação ao logradouro, distinguindo-o como de frente, de fundos, de vila ou encravado);

V_u Valor Unitário obtido pela Planta Genérica de Valores;

Assim, os pontos foram filtrados por tipo de uso residencial e misto, obtendo-se os dados mostrados na Figura 5.21.

Figura 5.21 - Mapa de calor de valores unitário padrões de edificações residenciais para a Bacia do Canal do Mangue.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para obtenção das variáveis independentes de ambiente, foram considerados os quantitativos de equipamentos urbanos cuja área de abrangência interceptava o ponto do endereço do imóvel. Para isso, foram estipulados raios de abrangências baseados na propensão de caminhada já preconizados no planejamento urbano.

De modo geral, utilizou-se preferencialmente os raios de 400 metros (5 minutos de caminhada) e 800 metros (10 minutos de caminhada). Carvalho, Kraus Junior, *et al.* (2017) apontam que 90% dos trabalhos devem viver ou trabalhar dentro do raio de 400 metros de uma parada de ônibus ou dentro de 800 metros de estações de transporte ferroviários. Além disso, tais valores correspondem aos estipulados pelo *LEED for Neighborhood Development* (USGBC, 2014). Seguindo esta lógica, estimou-se que as pessoas teriam propensão de caminhar menos para serviços de alta oferta e mais para serviços de menores ofertas.

Oliveira e Filho (2022) apontam referências de raios de abrangências para educação variando de 300 a 400 metros para unidades de ensino infantil, 400 a 1.500 metros para ensino fundamental e 800 a 3.000 metros para ensino médio.

Optou-se por adotar raios de 800 metros para unidades de ensino médio e 400 metros para as demais.

As unidades de saúde com raio de abrangência iguais a zero foram desconsideradas na análise por serem unidades móveis ou julgadas como irrelevantes na escolha de um imóvel residencial.

Os raios de abrangência estipulados para a equipamentos de saúde e educação estão listados no Quadro 5.1 e Quadro 5.2, respectivamente. Já os raios de abrangência utilizados para comércio e lazer encontram-se no Quadro 5.3.

Quadro 5.1 - Raio de abrangência considerados para estabelecimentos de saúde.

DESCRIÇÃO	RAIO (m)
Unidade de apoio diagnose e terapia (sadt isolado)	0
Servico de atencao domiciliar isolado (home care)	0
Central de abastecimento	0
Unidade movel de nivel pre-hospitalar na area de urgencia	0
Centro de atencao hemoterapia e ou hematologica	0
Unidade movel terrestre	0
Central de notificacao, captacao e distrib de orgaos estadual	0
Central de gestao em saude	0
Central de regulacao do acesso	0
Telessaude	0
Polo academia da saude	0
Central de regulacao medica das urgencias	0
Oficina ortopedica	0
Polo de prevencao de doencas e agravos e promocao da saude	0
Farmacia	250
Consultorio isolado	400
Centro de saude/unidade basica	400
Laboratorio de saude publica	400
Centro de imunizacao	400
Unidade de vigilancia em saude	400
Centro de atencao psicossocial	400
Pronto socorro especializado	400
Pronto atendimento	400
Pronto socorro geral	400
Clinica/centro de especialidade	800
Policlinica	800
Hospital geral	1600
Hospital/dia - isolado	1600
Hospital especializado	1600

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5.2 - Raio de abrangência considerados para estabelecimentos de educação.

DESCRIÇÃO	RAIO (m)
Ensino fundamental	400
Educação infantil, ensino fundamental	400
Educação infantil	400
Ensino fundamental, educação de jovens adultos	400
Educação de jovens adultos	400
Educação infantil, ensino fundamental, educação de jovens adultos	400
Educação profissional	400
Educação infantil, ensino fundamental, ensino médio	800
Ensino médio, educação profissional, educação de jovens adultos	800
Ensino médio, educação de jovens adultos	800
Ensino médio	800
Ensino fundamental, ensino médio, educação profissional	800
Ensino fundamental, ensino médio, educação de jovens adultos	800
Ensino médio, educação profissional	800
Ensino fundamental, ensino médio	800
Educação infantil, ensino fundamental, ensino médio, educação profissional, educação de jovens adultos	800
Ensino fundamental, ensino médio, educação profissional, educação de jovens adultos	800

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5.3 - Raio de abrangência considerados para estabelecimentos de comércio e lazer.

VARIÁVEL	UNIDADE	RAIO (m)
COMERCIO	Shopping Center	1.600
	Supermercado	800
	Outros	400
LAZER	Academia	400
	Clubes de esporte, Estádio, Praças e Parques	800

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, foram obtidas as variáveis presentes na Tabela 5.2, onde pode ser observada uma análise estatística descritiva das mesmas. Observa-se valores de altura máxima de cheia de 5,17 metros. Tal ocorrência encontra-se em uma célula de encosta, onde sua representação tem como enfoque o processo hidrológico de transformação chuva-vazão e tais valores elevados terão seus impactos avaliados.

Tabela 5.2 – Análise estatística descritiva das variáveis obtidas para a bacia do Canal do Mangue.

Variável	Descrição	Mínimo	Médio	Máximo	Desvio Padrão
PGV	Valor Unitário Padrão (R\$/m ²)	395,04	1722,95	3286,36	594,37
RENDA_MED	Renda mensal média do setor censitário pertencente. (R\$)	819,11	4761,19	13834,08	2159,17
num_pavime	Número de pavimentos	0,00	3,24	24,00	2,82
TRANS_METR	Qnt. de estações de metrô dentro do raio de 800 m	0,00	0,64	3,00	0,83
DIST_METRO	Distância da estação de metrô mais próxima (m)	12,49	1151,42	4073,96	775,32
TRANS_ONIB	Qnt. de linhas de ônibus municipais dentro do raio de 250 m	0,00	31,93	223,00	28,32
EDUC_PUBLI	Qnt. de estabelecimentos de educação pública dentro do raio de abrangência	0,00	3,43	12,00	1,95
EDUC_PRIVA	Qnt. de estabelecimentos de educação privada dentro do raio de abrangência	0,00	6,68	24,00	5,53
SAUD_PUBLI	Qnt. de estabelecimentos de saúde pública dentro do raio de abrangência	0,00	2,90	7,00	1,89
SAUD_PRIVA	Qnt. de estabelecimentos de saúde privada dentro do raio de abrangência	0,00	51,82	680,00	83,51
SEG_FOGOOCR	Qnt. de ocorrências de troteio no raio de 1000 m	0,00	32,64	210,00	31,44
COMERCIO	Qnt. de comércio dentro do raio de abrangência	0,00	20,92	108,00	18,11
LAZER	Qnt. de equipamentos de lazer dentro do raio de abrangência	0,00	10,01	22,00	4,00
HID_PC	Distância até o ponto crítico de drenagem mais próximo (m)	8,75	651,94	4062,35	501,37
HID_NA_05	Resultado de altura máx. de cheia da situação atual da modelagem para TR=5 anos (m)	0,00	0,35	5,17	0,51

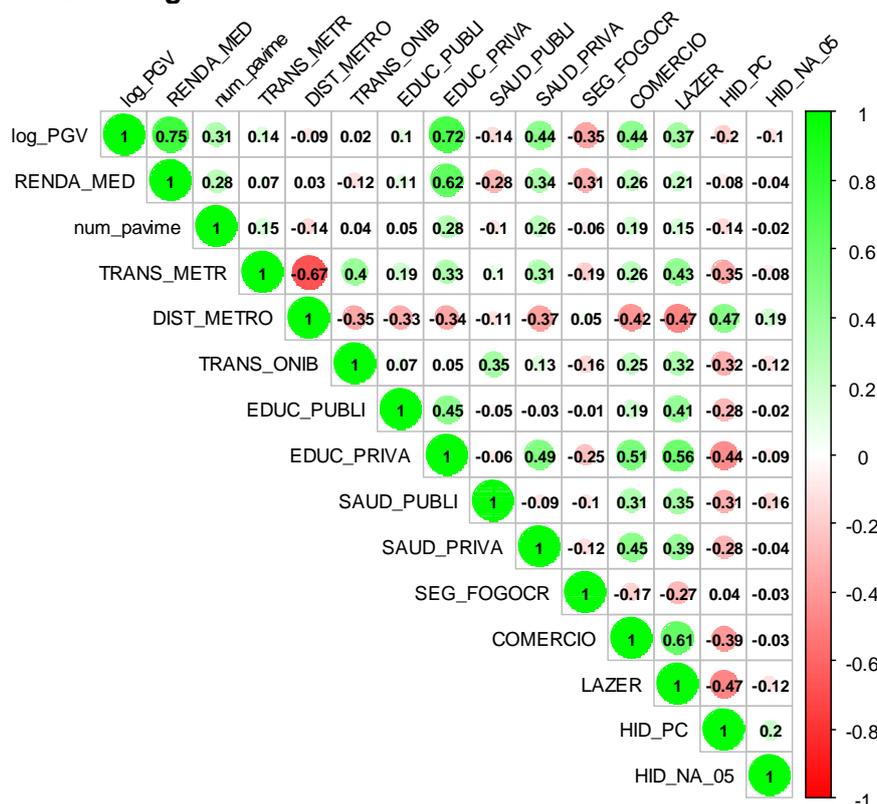
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a finalidade de obter os efeitos marginais das variáveis sobre o valor unitário padrão da planta genérica de valores, a variável PGV foi transformada para a escala logarítmica. Com essa transformação, os coeficientes das variáveis explicativas podem ser interpretados como mudanças percentuais na variável PGV.

Para auxiliar na avaliação da correlação das variáveis, foi elaborado o correlograma da Figura 5.22. É possível observar que as variáveis com maiores correlações positivas com os valores dos imóveis são a RENDA_MED,

EDUC_PIVA, SAUD_PRIVA, COMERCIO e LAZER. Já as variáveis com maiores correlações negativas foram SEG_FOGOOCR, HID_PC e SAUD_PUBL. A variável HID_NA_05 mostrou ter pequena correlação negativa sobre os valores dos imóveis e pequena correlação negativa com demais variáveis; podendo concluir que há uma ligeira carência de serviços em áreas de cheias.

Figura 5.22 - Correlograma das variáveis.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.2.2. Método dos Preços Hedônicos

A seguir são apresentados os resultados obtidos com os testes das regressões lineares múltiplas do método dos preços hedônicos.

Inicialmente foram elaborados testes utilizando modelos de regressão linear por estimador de mínimos quadrados ordinários (MQO) para avaliar o comportamento das variáveis e a adequação dos modelos. Foram efetuados testes considerando as alturas máximas de cheia (HID_NA_05), a variável *dummy* para imóveis dentro do raio de 800 metros de pontos críticos de drenagem (HID_PC_800), sendo 1 para dentro do raio e 0 para fora do raio, e das faixas de alturas máximas de cheia.

Para os três arranjos de variáveis, foram utilizados os dados completos, subconjuntos dos dados considerando as tipologias de casas e prédios separadamente, considerando imóveis apenas de células do tipo planície urbanizada e desconsiderando imóveis em células de encosta.

Para as faixas de alturas máximas de cheias, foram considerados os limites apresentados no Quadro 5.4. As variáveis *dummy* foram multiplicadas por HID_NA_05, assim os impactos de cada faixa puderam ser avaliados individualmente. Os resultados para os testes considerando altura máxima de cheia, proximidade com pontos críticos de drenagem e faixas de alagamentos encontram-se na Tabela 5.3, Tabela 5.4 e Tabela 5.5, respectivamente.

Quadro 5.4 – Parâmetros para definição das variáveis dummy de faixa de alagamentos.

VARIÁVEL DUMMY	LIMITES	JUSTIFICATIVA
HID_F1	$h_{m\acute{a}x} < 0,15 \text{ m}$	Alagamentos nos limites da via, sem atingir calçadas; sem muitos impactos
HID_F2	$0,15 \text{ m} \leq h_{m\acute{a}x} < 0,30 \text{ m}$	Alagamentos atingindo calçadas, redução de velocidade do tráfego de veículos. Danos a edificações de soleiras baixas.
HID_F3	$0,30 \text{ m} \leq h_{m\acute{a}x} < 0,50 \text{ m}$	Alagamentos na iminência de atingir edificações formais, interrupção total do tráfego de veículos.
HID_F4	$0,50 \text{ m} \leq h_{m\acute{a}x} < 1,00 \text{ m}$	Alagamentos causando prejuízos nas edificações. Alagamentos podendo atingir a rede elétrica.
HID_F5	$h_{m\acute{a}x} \geq 1,00 \text{ m}$	Alagamentos que podem causar afogamentos.

Fonte: adaptado de VERÓL (2013).

Tabela 5.3 - Resultados dos testes de regressões lineares múltiplas utilizando altura de inundação.

	Sem filtro	Planície Urb.	Sem Encosta	Casa	Prédio	Casa Planície	Prédio Planície	Casa Sem Encosta	Prédio Sem Encosta
Constante	6,868***	6,88451***	6,95888***	6,84463***	7,03188***	6,82914***	7,05654***	6,92006***	7,11817***
RENDA_MED	0,0001***	0,00006***	0,00006***	0,00007***	0,00007***	0,00006***	0,00006***	0,00006***	0,00005***
num_pavime	0,007***	0,00842***	0,00795***	-0,00164	0,00634***	0,01184***	0,00656***	0,01011***	0,00590***
COMERCIO	0,0036***	0,00404***	0,00431***	0,00378***	0,00215***	0,00442***	0,00253***	0,00483***	0,00254***
SEG_FOGOGR	-0,00125***	-0,00129***	-0,00164***	-0,00148***	-0,00082***	-0,00161***	-0,00073***	-0,00200***	-0,00089***
LAZER	0,00323***	0,00227***	0,00078	0,00551***	0,00187+	0,00373***	0,00303**	0,00014	0,00328**
TRANS_ONIB	0,00055***	0,00043***	0,00048***	0,00060***	0,00033**	0,00051***	0,00019+	0,00062***	0,00018+
DIST_METRO /1000	0,05666***	0,07150***	0,08798***	0,07524***	-0,00217	0,09343***	0,00869*	0,11658***	0,01434**
EDUC_PUBLI	-0,02795***	-0,02376***	-0,02236***	-0,02971***	-0,03380***	-0,02416***	-0,02905***	-0,02271***	-0,02749***
EDUC_PRIVA	0,02816***	0,02478***	0,02444***	0,03004***	0,02486***	0,02523***	0,02217***	0,02555***	0,02115***
SAUD_PRIVA	0,00008***	0,00013***	0,00016***	0,00005	0,00008**	0,00013**	0,00011***	0,00020***	0,00013***
SAUD_PUBLI	-0,01864***	-0,02801***	-0,03594***	-0,02138***	-0,01165***	-0,02958***	-0,02251***	-0,03866***	-0,02704***
HID_NA_05	-0,05693***	0,04862***	0,02451**	-0,05649***	-0,04298***	0,06204***	0,01555	0,04339***	-0,00644
Num.Obs.	20628	18119	15711	11104	6506	9308	6025	7751	5507
R2	0,729	0,738	0,729	0,725	0,695	0,745	0,686	0,745	0,657
AIC	296343,3	259885,5	226331,1	157885,4	94804,9	131969,2	87591,4	110480,8	80108,7
BIC	296454,3	259994,8	226438,4	157987,8	94899,8	132069,1	87685,2	110578,2	80201,3
Log.Lik.	4181.379	4482.579	3964.546	2229.871	1668.543	2363.315	1817.841	1947.998	1788.386
F	4625.381	4259.199	3522.385	2440.212	1230.650	2266.802	1092.302	1879.700	878.857
RMSE	0,20	0,19	0,19	0,20	0,19	0,19	0,18	0,19	0,17

Legenda: '***': 0 < p-valor < 0,001. '**': 0,001 < p-valor < 0,01. '*': 0,01 < p-valor < 0,05. '.': 0,05 < p-valor < 0,1. ' ': 0,1 < p-valor < 1,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5.4 - Resultados dos testes de regressões lineares múltiplas utilizando pontos críticos de drenagem.

	Sem filtro	Planície Urb.	Sem Encosta	Casa	Prédio	Casa Planície	Prédio Planície	Casa Sem Encosta	Prédio Sem Encosta
Constante	6.8525***	6.9241***	7.0468***	6.8296***	7.0146***	6.8756***	7.0713***	7.0266***	7.1605***
RENDA_MED	0.0001***	0.0001***	0.0001***	0.0001***	0.0001***	0.0001***	0.0001***	0.0001***	0.0001***
num_pavime	0.0075***	0.0085***	0.0081***	-0.0028	0.0064***	0.0108***	0.0065***	0.0092**	0.0058***
COMERCIO	0.0033***	0.0043***	0.0048***	0.0034***	0.0019***	0.0047***	0.0026***	0.0054***	0.0027***
SEG_FOGOCR	-0.0012***	-0.0014***	-0.0017***	-0.0014***	-0.0007***	-0.0017***	-0.0008***	-0.0021***	-0.0009***
LAZER	0.0033***	0.0018**	-0.0006	0.0055***	0.0022*	0.0031***	0.0029**	-0.0020*	0.0031**
TRANS_ONIB	0.0007***	0.0006***	0.0007***	0.0007***	0.0003**	0.0007***	0.0002*	0.0009***	0.0003**
DIST_METRO/1000	0.0454***	0.0696***	0.0874***	0.0627***	-0.0105*	0.0912***	0.0087*	0.1181***	0.0149**
EDUC_PUBLI	-0.0296***	-0.0229***	-0.0215***	-0.0307***	-0.0352***	-0.0229***	-0.0288***	-0.0203***	-0.0279***
EDUC_PRIVA	0.0293***	0.0259***	0.0261***	0.0316***	0.0250***	0.0268***	0.0225***	0.0279***	0.0218***
SAUD_PRIVA	0.0001**	0.0001***	0.0002***	0.0000	0.0001*	0.0001**	0.0001***	0.0003***	0.0001***
SAUD_PUBLI	-0.0144***	-0.0271***	-0.0365***	-0.0154***	-0.0098***	-0.0280***	-0.0226***	-0.0379***	-0.0287***
HID_PC_800	-0.0215***	-0.0467***	-0.0983***	-0.0342***	0.0089	-0.0535***	-0.0192*	-0.1180***	-0.0535***
Num.Obs.	20628	18119	15711	11104	6506	9308	6025	7751	5507
R2	0.724	0.740	0.737	0.721	0.691	0.747	0.686	0.756	0.660
AIC	296706.5	259789.4	225889.0	158070.9	94882.0	131894.0	87586.9	110116.0	80071.8
BIC	296817.6	259898.6	225996.3	158173.4	94976.9	131994.0	87680.7	110213.3	80164.4
Log.Lik.	3.999.745	4.530.662	4.185.592	2.137.112	1.630.000	2.400.889	1.820.091	2.130.440	1.806.826
F	4.514.650	4.289.894	3.660.243	2.384.469	1.209.781	2.291.456	1.093.492	2.001.387	887.839
RMSE	0.20	0.19	0.19	0.20	0.19	0.19	0.18	0.18	0.17

Legenda: '***': 0 < p-valor < 0,001. '**': 0,001 < p-valor < 0,01. '*': 0,01 < p-valor < 0,05. '.': 0,05 < p-valor < 0,1. ': 0,1 < p-valor < 1,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5.5 - Resultados dos testes de regressões lineares múltiplas utilizando faixas de inundação.

	Sem filtro	Planície Urb.	Sem Encosta	Casa	Prédio	Casa Planície	Prédio Planície	Casa Sem Encosta	Prédio Sem Encosta
Constante	6.79603***	6.81157***	6.92495***	6.75725***	6.98047***	6.73242***	7.02029***	6.87271***	7.10709***
RENDA_MED	0.00007***	0.00006***	0.00006***	0.00007***	0.00006***	0.00007***	0.00006***	0.00006***	0.00005***
num_pavime	0.00763***	0.00810***	0.00791***	0.00213	0.00625***	0.01242***	0.00641***	0.01058***	0.00584***
COMERCIO	0.00329***	0.00395***	0.00425***	0.00347***	0.00198***	0.00427***	0.00248***	0.00456***	0.00257***
SEG_FOGOCR	-0.00112***	-0.00128***	-0.00163***	-0.00124***	-0.00081***	-0.00153***	-0.00072***	-0.00191***	-0.00089***
LAZER	0.00346***	0.00242***	0.00062	0.00605***	0.00189+	0.00419***	0.00307**	-0.00033	0.00344**
TRANS_ONIB	0.00050***	0.00046***	0.00051***	0.00055***	0.00029**	0.00059***	0.00018+	0.00069***	0.00018
DIST_METRO/1000	0.05692***	0.07054***	0.08808***	0.07357***	-0.00337	0.09112***	0.00601	0.11483***	0.01308**
EDUC_PUBLI	-0.03049***	-0.02509***	-0.02308***	-0.03286***	-0.03501***	-0.02601***	-0.02954***	-0.02337***	-0.02773***
EDUC_PRIVA	0.02809***	0.02525***	0.02508***	0.02994***	0.02461***	0.02624***	0.02205***	0.02662***	0.02111***
SAUD_PRIVA	0.00009***	0.00012***	0.00017***	0.00003	0.00008**	0.00009*	0.00010***	0.00022***	0.00012***
SAUD_PUBLI	-0.01910***	-0.02775***	-0.03489***	-0.02139***	-0.01235***	-0.02915***	-0.02261***	-0.03611***	-0.02739***
HID_NA_05 x HID_F1	0.69454***	0.92352***	0.45015***	0.71495***	0.57993***	1.13817***	0.43672***	0.51606***	0.15140
HID_NA_05 x HID_F2	0.29060***	0.37713***	0.08806*	0.25877***	0.30374***	0.42123***	0.24845***	0.06132	0.05197
HID_NA_05 x HID_F3	0.21236***	0.26199***	0.10450***	0.23645***	0.18652***	0.32432***	0.15867***	0.12951***	0.05261
HID_NA_05 x HID_F4	0.14765***	0.18070***	0.09859***	0.16507***	0.07661***	0.22689***	0.05778**	0.14137***	-0.00429
HID_NA_05 x HID_F5	-0.04785***	-0.00755	-0.05428***	-0.04709***	-0.02893***	-0.06700***	0.05805**	-0.11956***	0.02404
Num.Obs.	20628	18119	15711	11104	6506	9308	6025	7751	5507
R2	0.736	0.743	0.732	0.736	0.698	0.755	0.687	0.752	0.658
AIC	295788.9	259581.3	226153.2	157470.8	94745.6	131632.3	87572.5	110251.8	80108.3
BIC	295931.7	259721.8	226291.1	157602.4	94867.6	131760.8	87693.2	110377.0	80227.4
Log.Lik.	4.462.552	4.638.699	4.057.501	2.441.209	1.702.187	2.535.753	1.831.251	2.066.510	1.792.577
RMSE	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.18	0.18	0.19	0.17

Legenda: '***': 0 < p-valor < 0,001. '**': 0,001 < p-valor < 0,01. '*': 0,01 < p-valor < 0,05. ': 0,05 < p-valor < 0,1. ': 0,1 < p-valor < 1,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando os resultados baseados na altura máxima de cheia da Tabela 5.3, é possível concluir que em comparação apenas aos imóveis em regiões de planícies urbanizadas e planas, o coeficiente da variável HID_NA_05 é positivo ou de insignificância estatística (p -valor $< 0,05$), indicando a hipótese de que as cheias não é um fator relevante na definição dos preços dos imóveis. Já os demais apontaram coeficientes negativos e de significância estatística, sendo de maior impacto para imóveis do tipo casa do que em prédios, condizente com o senso comum. O coeficiente do DIST_METRO apresentou coeficientes incoerentes em todos os testes. Onde seu valor foi negativo, apresentou insignificância estatística.

Já em relação aos resultados baseados na proximidade com pontos críticos de drenagem da Tabela 5.4, é possível identificar que imóveis no raio de 800 metros dos pontos críticos tem valores unitários padrões menores do que os imóveis mais afastados. O impacto varia de 2,15%, ao comparar a bacia como o todo, à 9,83%, ao comparar apenas imóveis fora das encostas. Além disso, os impactos mostraram ser relevantes apenas em residências de tipo casa, gerando uma redução de 3,42%. Para prédios o valor foi reduzido e com insignificância estatística.

Por fim, os resultados baseados nas faixas de alagamentos da Tabela 5.5 apresentaram valores positivos pra alturas de cheia até 1,00 metro e elevada significância estatística, exceto para prédios sem encosta. Os impactos negativos só foram identificados em alagamentos acima de 1,00 metro de altura e apresentaram coeficientes menores aos do teste de altura máxima da Tabela 5.3.

Em todos os testes, as casas tiveram resultados mais susceptíveis aos alagamentos. Vale ressaltar que o número de observações dos subconjuntos de dados de casas é bem superior ao de prédio.

Apesar da incoerência do coeficiente da variável DIST_METRO, o modelo selecionado de melhor ajuste e mais generalista foi o modelo sem filtro. Em seguida, foram aplicados testes para avaliar presença de heterocedasticidade, multicolinearidade e normalidade dos erros do modelo.

Para a heterocedasticidade, foi aplicado o teste Breusch-Pagan, obtendo o valor de p inferior a 0,05, rejeitando a hipótese nula do modelo homocedástico, ou seja, que a variância do erro não é constante ao longo dos valores preditos, sendo um problema para o modelo de regressão.

Para a multicolinearidade, foi empregado o fator de inflação da variância (FIV), conforme Quadro 5.5. Como os valores de FIV ficaram abaixo de 5, logo as correlações entre as variáveis foram consideradas aceitáveis.

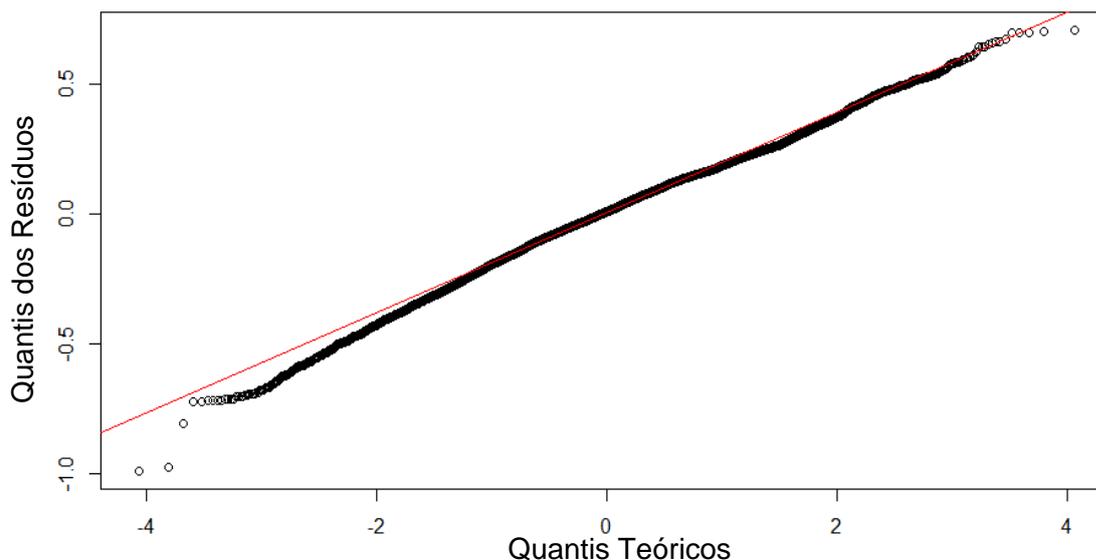
Quadro 5.5 - Valores de Fator de Inflação de Variância por variável.

VARIÁVEL	FIV	VARIÁVEL	FIV
RENDA_MED	2,31	DIST_METRO/1000	1,77
num_pavime	1,14	EDUC_PUBLI	1,82
COMERCIO	2,08	EDUC_PRIVA	3,28
SEG_FOGOOCR	1,24	SAUD_PRIVA	1,91
LAZER	2,63	SAUD_PUBLI	1,83
TRANS_ONIB	1,34	HID_NA_05	1,12

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a verificação da normalidade dos erros, foi gerado o gráfico quantil-quantil (Q-Q), apresentado na Figura 5.23. O gráfico serve para comparar a distribuição dos resíduos com uma distribuição normal teórica. É possível notar desvios na extremidade inferior esquerda e superior direita, porém dentro dos limites aceitáveis. Tal ocorrência sugere que há influência de *outliers* no modelo.

Figura 5.23 – Gráfico Q-Q do modelo de regressão linear múltipla.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por conta da presença de heterocedasticidade nos resíduos no modelo, houve a necessidade de avaliar modelos de autoregressivos em busca de melhor desempenho.

5.4.2.3. Modelos de Autorregressão Espacial

Segundo Bui, Wen, *et al.* (2022), o uso de técnicas de econometria espacial tem aprimorado a performance do método dos preços hedônicos; a influência espacial não pode ser ignorada no mercado imobiliário.

Primeiro passo para aplicação do método é a verificação de correlação espacial das variáveis e do modelo. Para isso, foi empregado o teste Moran global para as variáveis de interesse PGV e HID_NA_05 e para os resíduos do modelo MQO. Espera-se alta correlação espacial pelo fato de o PGV ser obtido por trecho de logradouro e o HID_NA_05 pelos polígonos das células. Como os modelos de autorregressão espaciais exigem muito computacionalmente, foi extraída aleatoriamente uma amostragem de 5000 observações do conjunto de dados original.

Os resultados de p-valor dos testes para ambas variáveis e resíduos foram próximas de zero e os valores dos testes foram elevados, indicando elevada correlação espacial e significância estatística, conforme Tabela 5.6. Na Figura 5.24 são apresentados os gráficos de dispersão de Moran, com o eixo vertical sendo a média das variáveis sobre os vizinhos e o horizontal o próprio valor da variável.

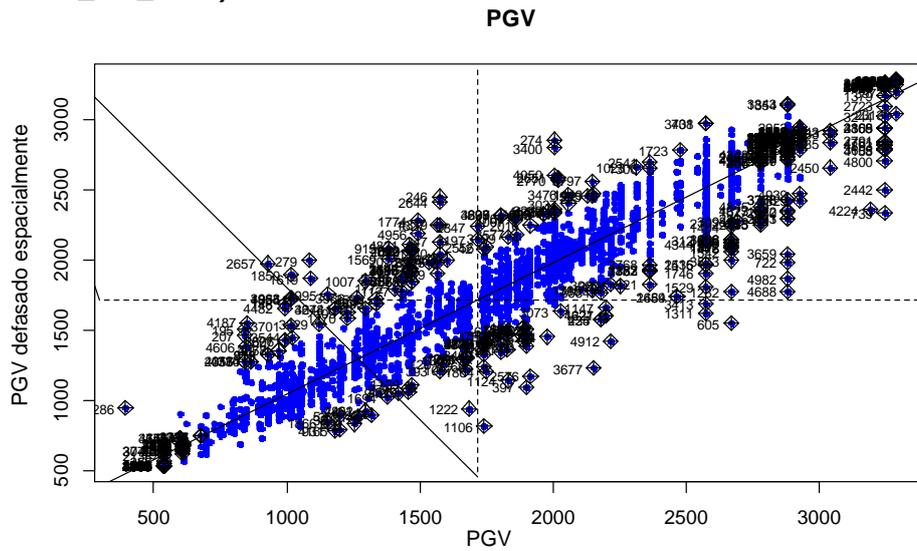
Tabela 5.6 - Valores resultantes do teste de Moran para autocorrelação espacial.

Variável	Estatística I de Moran	p-valor
PGV	0,934	$< 2.2 \times 10^{-16}$
HID_NA_05	0,887	$< 2.2 \times 10^{-16}$
RESÍDUOS	0,724	$< 2.2 \times 10^{-16}$

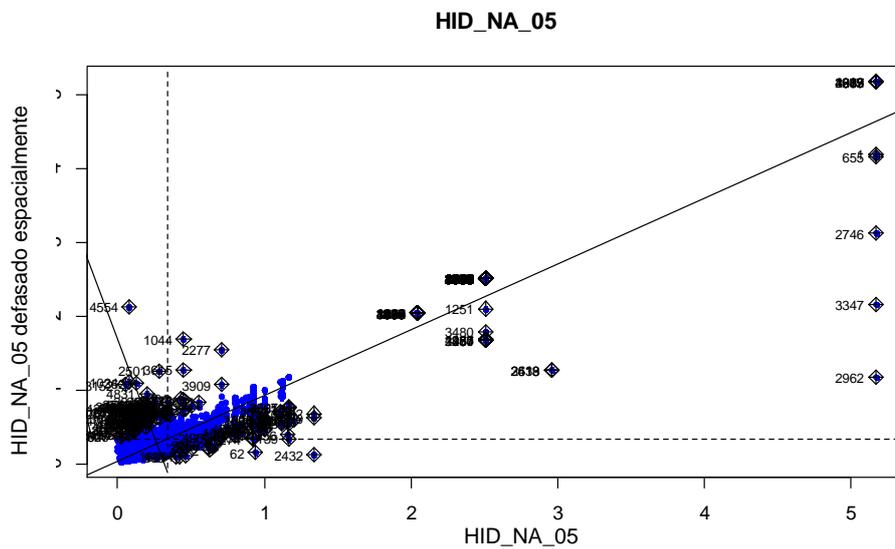
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.24 - Gráficos de dispersão de Moran. a) Para variável PGV. b) Para a variável HID_NA_05. c) Para os resíduos.

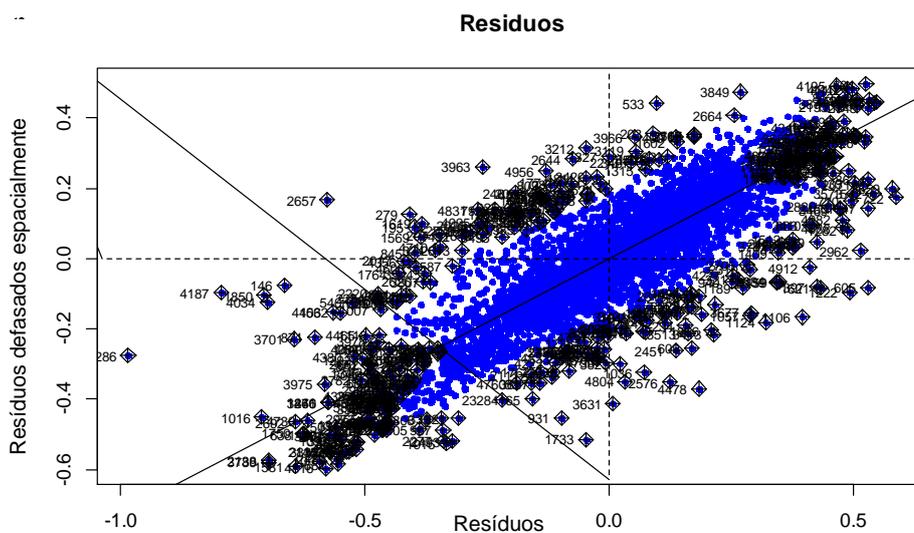
a)



b)



c)



Fonte: Elaborado pelo autor.

O segundo passo é definir o modelo mais adequado dentre os seguintes: Modelo Autorregressivo Espacial (*SAR*, defasagem na variável dependente); Modelo de Erro Espacial (*SEM*, defasagem no erro); ou Modelo Autorregressivo e de Médias Móveis Espacial (*SARMA*, defasagem na variável dependente, no erro e incorporação de média móvel espacial no erro). Para isso, são aplicados os testes de multiplicador de Lagrange normais (LMlag e LMerr) e robustos (RLMlag, RLMerr) e SARMA. Seus resultados encontram-se na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Resultados dos testes de multiplicador de Lagrange.

Teste	Valor de estatística	p-valor
LMlag	7385.5	$< 2.2 \times 10^{-16}$
LMerr	7363.2	$< 2.2 \times 10^{-16}$
RLMlag	391.95	$< 2.2 \times 10^{-16}$
RLMerr	369.66	$< 2.2 \times 10^{-16}$
SARMA	7755.2	$< 2.2 \times 10^{-16}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os testes não indicaram algum modelo específico para os dados, porém, por ter valor de estatística superior, o modelo SARMA parece ter maior ajuste.

Com isso, os seguintes modelos de autorregressão espacial foram testados: Modelo Geral Espacial (*GSM*, defasagem na variável dependente (*Y*), nas variáveis independentes (*X*) e no erro); Modelo de Durbin Espacial (*SDEM*, defasagem em *X* e no erro); Modelo Autorregressivo Espacial Combinado (*SAC*, defasagem em *Y* e no erro); e Modelo Autorregressivo e de Médias Móveis Espacial (*SARMA*, defasagem em *Y*, no erro e incorporação de média móvel espacial no erro). Os resultados obtidos estão demonstrados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Resultados dos modelos de autorregressão espacial.

	SDEM			SAC			GNS			SARMA		
	Coef.	Desvio Padrão	p-valor									
Constante	6,8778	0,0455	0,0000	1,1933	0,0818	0,0000	1,2769	0,1021	0,0000	1,0977	0,0419	0,0000
RENDA_MED	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
num_pavime	0,0024	0,0006	0,0001	0,0022	0,0005	0,0000	0,0020	0,0005	0,0002	0,0023	0,0005	0,0000
COMERCIO	0,0007	0,0008	0,3364	0,0007	0,0001	0,0000	0,0009	0,0008	0,2632	0,0006	0,0001	0,0000
SEG_FOGOOCR	-0,0007	0,0002	0,0003	-0,0002	0,0001	0,0000	-0,0006	0,0002	0,0013	-0,0002	0,0000	0,0000
LAZER	0,0010	0,0022	0,6430	0,0004	0,0006	0,5042	0,0016	0,0024	0,5091	0,0004	0,0006	0,5008
TRANS_ONIB	0,0000	0,0002	0,9534	0,0001	0,0001	0,0427	0,0000	0,0002	0,8238	0,0001	0,0001	0,0415
DIST_METRO/1000	-0,2948	0,0675	0,0000	0,0079	0,0026	0,0021	-0,2774	0,0621	0,0000	0,0071	0,0023	0,0023
EDUC_PUBLI	-0,0011	0,0028	0,7050	-0,0045	0,0010	0,0000	0,0029	0,0030	0,3328	-0,0042	0,0010	0,0000
EDUC_PRIVA	0,0089	0,0021	0,0000	0,0045	0,0006	0,0000	0,0069	0,0023	0,0025	0,0041	0,0005	0,0000
SAUD_PRIVA	0,0002	0,0002	0,3455	0,0000	0,0000	0,8175	0,0002	0,0002	0,3270	0,0000	0,0000	0,8870
SAUD_PUBLI	-0,0089	0,0055	0,1054	-0,0033	0,0011	0,0024	-0,0055	0,0060	0,3578	-0,0030	0,0010	0,0030
HID_NA_05	-0,0106	0,0091	0,2438	-0,0113	0,0034	0,0007	-0,0050	0,0096	0,6050	-0,0103	0,0031	0,0009
lag.RENDA_MED	0,0000	0,0000	0,0000	-	-	-	0,0000	0,0000	0,0104	-	-	-
lag.num_pavime	0,0048	0,0019	0,0098	-	-	-	0,0015	0,0011	0,1994	-	-	-
lag.COMERCIO	0,0032	0,0010	0,0009	-	-	-	-0,0002	0,0008	0,8193	-	-	-
lag.SEG_FOGOOCR	-0,0007	0,0003	0,0192	-	-	-	0,0004	0,0002	0,0411	-	-	-
lag.LAZER	-0,0005	0,0035	0,8887	-	-	-	-0,0009	0,0025	0,7244	-	-	-
lag.TRANS_ONIB	0,0007	0,0003	0,0171	-	-	-	0,0002	0,0002	0,3711	-	-	-
lag.DIST_METRO/1000	0,3582	0,0689	0,0000	-	-	-	0,2849	0,0622	0,0000	-	-	-
lag.EDUC_PUBLI	-0,0190	0,0050	0,0001	-	-	-	-0,0086	0,0032	0,0067	-	-	-
lag.EDUC_PRIVA	0,0205	0,0029	0,0000	-	-	-	-0,0024	0,0024	0,3189	-	-	-
lag.SAUD_PRIVA	0,0000	0,0002	0,9814	-	-	-	-0,0002	0,0002	0,2999	-	-	-
lag.SAUD_PUBLI	-0,0110	0,0073	0,1336	-	-	-	0,0024	0,0061	0,6989	-	-	-
lag.HID_NA_05	-0,0379	0,0174	0,0298	-	-	-	-0,0058	0,0106	0,5861	-	-	-
δ (Defasagem em Y)	-	-	-	0,83	0,01	0,00	0,81	0,01	0,00	0,84	0,01	0,00
λ (Defasagem no erro)	0,84	0,01	0,00	0,07	0,04	0,12	0,10	0,05	0,04	-	-	-
Pseudo-R2	0,937			0,936			0,936			0,937		
AIC	-8103,92			-8122,10			-8147,80			-8121,40		
Log Likelihood	4078,96			4077,05			4101,91			4075,71		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por ter o menor valor de Critério de Informação de Akaike (AIC) e maior log-verossimilhança (Log Likelihood) dentre os demais modelos, o Modelo Geral Espacial (GNS) obteve o melhor desempenho. Percebe-se uma melhora significativa no coeficiente de determinação em relação ao modelo MQO de 72,9%.

Observa-se que grande parte das variáveis teve significância estatística baixa. Ressalta-se que os coeficientes indicam os impactos diretos de cada imóvel, ou seja, a influência das variáveis intrínsecas do imóvel, enquanto as variáveis iniciadas com “lag” são os impactos indiretos (ou *spillovers*), ou seja, a influência das variáveis dos vizinhos sobre o imóvel. Os impactos diretos e indiretos tiveram baixa significância estatística, porém os impactos totais podem ter maior influência sobre a variável dependente.

Foram elaboradas 1000 simulações do modelo GNS para obtenção dos impactos totais. Seus resultados médios são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Resultados de impactos totais dos coeficientes do Modelo Geral Espacial (GNS).

	Impacto Total		
	Coef.	Des. Padrão	p-valor
RENDA_MED	0,0001	0,0000	0,0000
num_pavime	0,0185	0,0062	0,0025
COMERCIO	0,0038	0,0007	0,0000
SEG_FOGOOCR	-0,0011	0,0003	0,0004
LAZER	0,0037	0,0036	0,3054
TRANS_ONIB	0,0008	0,0004	0,0358
DIST_METRO /1000	0,0396	0,0138	0,0047
EDUC_PUBLI	-0,0306	0,0061	0,0000
EDUC_PRIVA	0,0240	0,0028	0,0000
SAUD_PRIVA	-0,0001	0,0001	0,5842
SAUD_PUBLI	-0,0168	0,0065	0,0115
HID_NA_05	-0,0571	0,0206	0,0053

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conclui-se que há uma redução de 5,71% nos valores unitários padrões dos imóveis por metro de altura máxima de alagamento de eventos hidrológicos de tempo de recorrência de 5 anos.

A última etapa consiste em calcular o valor de benefício imobiliário para cada célula de escoamento e cenários. Primeiro, a área construída para cada célula

foi calculada pelo somatório produto das áreas de polígonos de edificações e a quantidade de pavimentos pertencentes à célula. Em seguida, foram calculadas as reduções de altura máxima de cheia para cada cenário. Posteriormente, foi calculado o valor médio por metro quadrado dos bairros da grande Tijuca baseados nos valores de ITBI.

Os benefícios para cada célula foram calculados pelo produto da redução da altura máxima de cheia, em metros, com a área construída residencial total da célula e o valor por metro quadrado para a grande tijuca de R\$ 4.471,77 por metro quadrado. Por conta da consideração de vida útil das soluções em 30 anos, apenas benefícios de TRs menores ou iguais a 25 foram calculados, já que a percepção de benefícios de TRs maiores seriam sentidos posteriormente. Os resultados dos tempos de recorrências foram somados, obtendo os resultados por cenário presentes na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Resultados de valorização imobiliária por cenário para TR ≤ 25 anos (x R\$ 1.000.000,00).

Cenário	TR001	TR005	TR010	TR025
TV	R\$66,47	R\$48,99	R\$50,51	R\$55,77
RL	R\$243,24	R\$340,29	R\$339,86	R\$292,23
IF	R\$248,00	R\$366,89	R\$437,24	R\$477,44
SUDS	R\$848,56	R\$1.157,18	R\$1.310,83	R\$1.447,66

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5. BENEFÍCIOS DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS

A seguir, são apresentados os resultados de benefícios de serviços ecossistêmicos de redução de consumo de energia por refrigeração de ambientes por telhados verdes e de redução do consumo de água potável pelo aproveitamento de água de chuva de reservatórios de lote distribuídos pela bacia do Canal do Mangue.

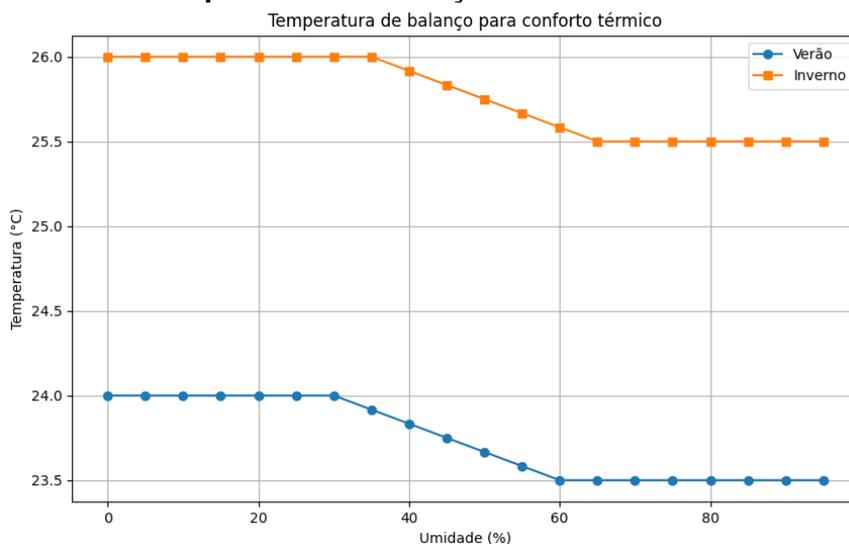
5.5.1. Economia de Energia de Refrigeração de Ambiente

Para calcular a economia de energia por refrigeração do ambiente, foram utilizados os dados da estação meteorológica do Forte de Copacabana do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) com dados horários da série histórica desde 2010.

A temperatura de balanço (ou base) foi calculada em função das médias diárias da temperatura do bulbo seco e umidade relativa considerando os limites

superiores de temperatura para conforto térmico da NBR 16.401-2:2008 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008), conforme Figura 6.25. Foram considerados como verão os meses de setembro à fevereiro e como inverno os meses de março à outubro. Onde os valores de umidade foram nulos, considerou-se a temperatura igual a 23°C.

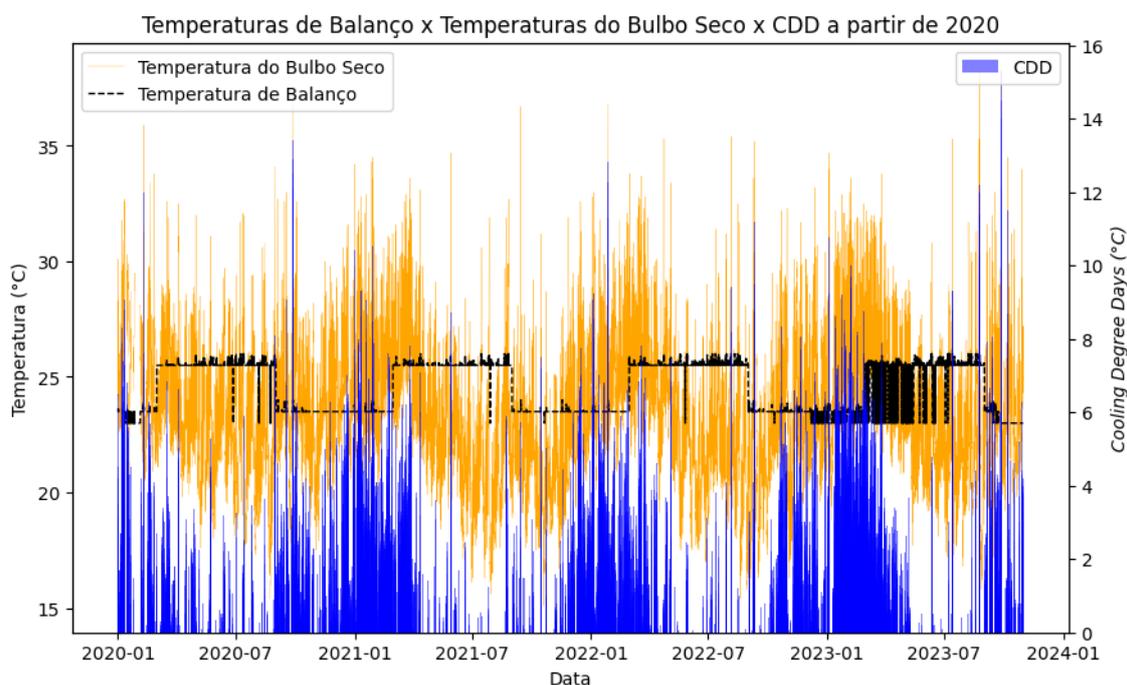
Figura 5.25 - Temperatura de conforto térmico em função da umidade do ar considerados como temperatura de balanço.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente, foram calculados os valores de *cooling degrees days* (CDD). Primeiramente, foi calculada diferença nos dados horários de temperatura do bulbo seco e a temperatura de balanço. Em seguida, seus valores foram somados anualmente e divididos por 24 para obter o somatório anual de CDD. Assim, o CDD considerado foi a média dos valores anuais desde 2010. A Figura 5.26 mostra um exemplo dos dados a partir de 2020.

Figura 5.26 - Gráfico de exemplo com os valores de temperaturas e CDD desde 2020.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O CDD anual médio obtido desde 2010 foi de 341,82°C. Os valores de transmitância térmica global considerados foi da laje pré-moldada de 2,89 W/m²·C^o e do telhado verde foi de 1,86 W/m²·C^o (Projeteee - Componentes Construtivos, [s.d.]). O custo médio de energia elétrica residencial para o mês de abril de 2024 considerado foi de R\$ 1,08383 por kWh (Light, 2024). Assim, a redução do custo por energia elétrica anual foi calculada com as Equações 3.24 e 3.25; obtendo o valor de R\$ 17,15 por metro quadrado de telhado verde e o valor global, para toda a bacia, de R\$ 67.500.110,71.

5.5.2. Economia por Aproveitamento de Água de Chuva

Para o cálculo da economia por aproveitamento de água de chuva (AAC), foi necessário calcular a demanda por AAC e o volume de água de chuva disponível por edificação. A demanda por AAC foi considerada como sendo água de descarga de vasos sanitários, água de irrigação, de lavagem de carro e de pisos. A redução do volume de consumo de água potável foi considerada o menor valor entre a demanda e a disponibilidade de AAC.

Primeiramente, a população por edificação foi calculada com base na densidade de habitantes por área construída obtido pelos setores censitários de 2022 (IBGE, 2024) e a área construída das edificações (produto da área da edificação

e número de pavimentos). Em seguida, o consumo total de água potável por edificação residencial foi calculado considerando o consumo per capita de 176,76 L/hab/dia obtido pelo SNIS (2022) para a cidade do Rio de Janeiro. Já para as edificações não-residenciais, foi calculado usado o consumo de 6 L/m²/dia (Totugui; Valverde; Sant'ana, 2018).

Para o cálculo da demanda de AAC, foram considerados os padrões de consumo da Quadro 5.6. Para cada edificação, foi considerada a área média de espaços livres obtida para a bacia do Canal do Mangue de 254 m². Além disso, foi considerada a porcentagem de 15% da área de espaço livre para irrigação com base na taxa de permeabilidade mínima da Lei Complementar n° 73, de 29 de Julho de 2004, que institui o Programa de Estruturação Urbana (PEU) de São Cristóvão (Rio de Janeiro (município), 2004) e no Projeto de Lei Complementar n° 39/1999 que instituiria o PEU Tijuca (Rio de Janeiro (município), 1999).

Quadro 5.6 – Padrão de consumo para aproveitamento de água de chuva.

Uso	Padrão de consumo	Unidade de aplicação
Descarga de vaso sanitário	21% do consumo de água interno (GONÇALVES, 2009)	21% da diferença do consumo total e o consumo externo
Lavagem de carros	50 L/dia por veículo duas vezes por mês (MAY, 2004)	0,38 carros por habitante (DATA.RIO, 2022)
Lavagem de pisos	0,7 L/m ² /dia 2 vezes por semana (NASCIMENTO; SANT'ANA, 2014)	85% da área média de espaços livres.
Irrigação	1,5 L/m ² /dia 3 vezes por semana no período seco (VÉROL; VAZQUEZ; MIGUEZ, 2019)	15% da área média de espaços livres.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o cálculo de água pluvial disponível, foi calculada a média da precipitação mensal dos dados da estação do forte de Copacabana do INMET desde 2010. Depois dividiu o valor pela soma da capacidade do reservatório em milímetros, 51 mm, e a altura de chuva descartada de *first flush* igual a 0,80 mm., obtendo a quantidade média mensal que o reservatório fica cheio igual a 1.76 vezes. Assim, o valor foi multiplicado pelos volumes de reservatórios das edificações.

Em posse dos volumes de consumo total e de aproveitamento de água de chuva, os valores médios mensais para a situação atual e reservatório de lote foram calculados segundo faixas de consumo conforme tarifa da Águas do Rio (2023) presente no Quadro 5.7.

Quadro 5.7 - Estrutura tarifária da Águas do Rio para categoria residencial (Tarifa 2) vigente a partir de novembro de 2023.

FAIXA DE CONSUMO (m³)	TARIFA POR FAIXA (R\$)
0 - 15	6,168976
16 - 30	13,571747
31 - 45	18,506927
46 - 60	37,013855
> 60	49,351807

Fonte: (Águas do Rio, 2023).

Assim o benefício anual calculado para toda a Bacia do Canal do Mangue foi de R\$ 143.084.993,91. Já o benefício anual por metro quadrado de telhado captado pelos reservatórios foi de R\$ 21,58. Das 27.396 edificações consideradas, 4.572 tiveram o volume de demanda superior ao disponível, correspondendo à 16.7% das edificações.

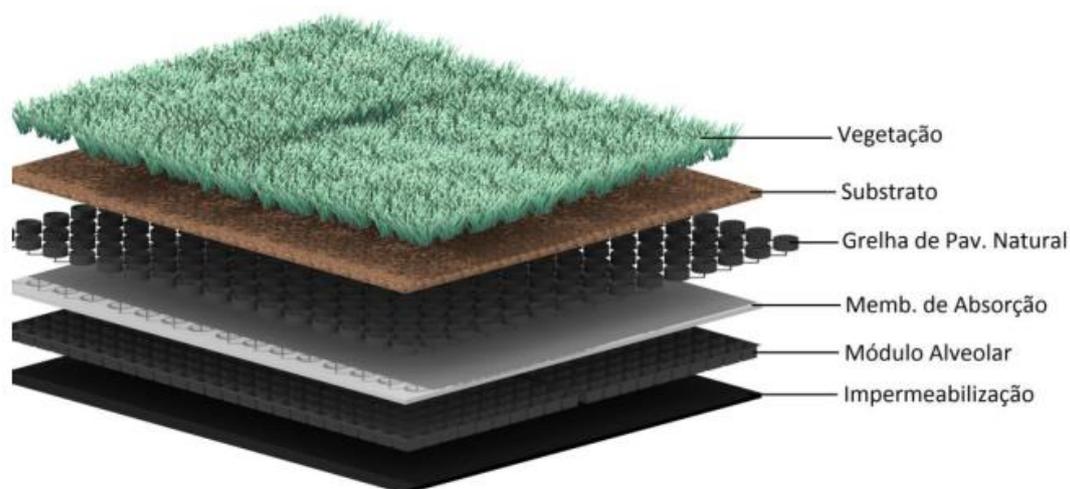
5.6. CUSTOS DE INSTALAÇÃO E MANUTENÇÃO

Os custos de instalação iniciais e de manutenções anuais foram obtidos seja por referências bibliográficas ou por planilha orçamentária elaborada com base no Sistema de Custo de Obra (PCRJ, 2024). Seus resultados são explanados a seguir.

5.6.1. Telhados Verdes

O modelo de telhado verde extensivo considerado foi de sistema modular alveolar grelhado conforme Figura 5.27.

Figura 5.27 - Esquema do telhado verde considerado no trabalho.



Fonte: (Ecotelhado, [s.d.]

O custo de material referente ao ecotelhado foi considerado segundo Savi (2012, p. 122), corrigido de 09/2012 para 04/2024, igual à R\$ 169,30 por metro quadrado de telhado. Já o custo de mão-de-obra foi considerado segundo Quadro 5.8. As horas de servente e pedreiro foram consideradas iguais ao de coberturas em telhas francesas. Já as horas de jardineiro foi igual a soma do necessário para plantio de plantas de cobertura e de plantio de grama tipo *Stenotaphrum Secundatum*. Assim, o custo de instalação por metro quadrado de telhado verde ficou igual à R\$ 239,54.

Quadro 5.8 - Custo de mão de obra de instalação por metro quadrado de telhado verde. (IO: 04/2024).

COD. SCO	DESCRIÇÃO DO ITEM	UN.	QNT	CUSTO UN.	CUSTO TOTAL
MOD002150	Pedreiro - assentamento de tijolo, bloco de concreto, alvenaria de pedra, serviços de lançamento de concreto	h	0.80	R\$ 27.70	R\$ 22.20
MOD002450	Servente	h	1.50	R\$ 18.60	R\$ 27.90
MOD001250	Jardineiro - trabalho de jardinagem	h	0.75	R\$ 24.05	R\$ 18,09
EVE000050	3% incidente sobre mão de obra direta com Encargos Sociais para cobrir despesas relativa a equipamentos de proteção individual, uniformes e ferramentas	%	1	R\$ 68,19	R\$ 2,05
TOTAL					R\$ 70,23

Fonte: (PCRJ, 2024)

Já seu custo de manutenção foi considerado o consumo de água por irrigação, conforme Quadro 5.6 aplicado à segunda faixa da estrutura tarifária do Quadro 5.7, e o custo de “manutenção e recomposição de áreas ajardinadas, corte de folhas e ramos secos, retirada de parasitas, limpeza e replantio de arbustos” (item PJ 20.05.0550 (A) do SCO) igual a R\$ 5.92 reais por metro quadrado anualmente. Assim, o custo de manutenção anual ficou em R\$ 7,58 por metro quadrado de telhado verde.

5.6.2. Reservatórios de Lote

O modelo de reservatório de lote considerado para o orçamento está apresentado na Figura 5.28.

Figura 5.28 – Modelo de reservatório considerando na metodologia. a) Imagem comercial dos tanques em área externa. b) Detalhe do dispositivo de descarte de *first flush* e cloração da água.



(a)



(b)

Fonte: (Tecnotri Indústria de Plásticos S.A., [s.d.])

O custo de instalação do reservatório de lote por metro cúbico foi baseado em pesquisa de três fornecedores de kits de reservatórios para aproveitamento de água de chuva, elaborada em 04/2019 e corrigida para 04/2024, e em outros materiais e mão de obra conforme Quadro 5.9.

Quadro 5.9 - Custo de instalação de reservatório de lote por metro cúbico (IO: 04/2024).

COD. SCO	ITEM	UN.	QNT.	CUSTO UN.	CUSTO TOTAL
	Kit Reuso de Água - Cisterna Vertical Modular 1000 Litros, inclusive Filtro anti-folhas, decanter, filtro fino e filtro clorador.	un	1	R\$ 3.572,73	R\$ 3.572,73
MAT002150	Adesivo plástico para PVC: 75gr	un	0.5	R\$ 4,13	R\$ 2,07
MAT074300	Joelho de PVC rígido, 90o, Serie R, diâmetro nominal de 100mm	un	2	R\$ 16,70	R\$ 33,40
MAT146900	Tubo de PVC rígido, PBV, Serie R, vara com 3m, diâmetro nominal de 100mm	un	4 ¹	R\$ 106,16	R\$ 424,64
MOD900650	Bombeiro - instalação hidro sanitária predial	h	1.2	R\$ 26,52	R\$ 31,83
MOD902450	Servente	h	1.2	R\$ 19,18	R\$ 23,02
TOTAL					R\$ 4.087,67

Fonte: Elaborado pelo autor.

¹ Foram considerados 12 metros de tubulação em PVC por conta da média de 4 pavimentos das edificações da bacia do Canal do Mangue.

Assim, o custo de instalação por metro cúbico de reservatório de lote foi de R\$ 4.087,67 e sua manutenção anual de R\$ 5,84.

5.6.3. Jardim de Chuva

O custo de instalação de jardim de chuva encontra-se discriminado em tabela orçamentária presente no Apêndice (ver Quadro 8.1) e seu valor anual de “manutenção e recomposição de áreas ajardinadas, corte de folhas e ramos secos, retirada de parasitas, limpeza e replantio de arbustos”, conforme apresentando em 3.6.

Assim, seu custo de instalação foi de R\$ 629,15 por metro quadrado e sua manutenção anual de R\$ 5,92 por metro quadrado.

5.6.4. Pavimento Permeável

O custo de instalação de pavimento permeável encontra-se discriminado em tabela orçamentária presente no Apêndice (ver Quadro 8.2) e sua manutenção anual apresentada no Quadro 5.10. Os serviços de manutenção e sua frequência foram baseados em Ballard *et al.* (2015).

Quadro 5.10 - Custo de manutenção anual de pavimento permeável por metro quadrado (IO: 04/2024).

COD. SCO	SERVIÇO	UN.	CUSTO UN.	QNT.	CUSTO TOTAL
1	Limpeza de pavimento permeável com jato d'água quente, varredura e sucção. Anualmente.	m²	R\$ 27,88	1	R\$ 27,88
1.1	IEQ014050 Lavadora de alta pressão, de 166/2400 (bar/psi), tensão 220/380V, modelo CSL 2400 FST, Electrolux ou similar	un	R\$ 32.500,00	0,000183	
1.2	SC 10.05.1450 Servente (inclusive encargos sociais).	h	R\$ 19,18	0,3600	
1.3	PJ 20.05.0909 (A) Varredura de folhas, papeis e etc., em área pavimentada.	ha	R\$ 383,50	0,0001	
1.4	LOXAM DEGRAUS Aspirador de Pó e Água 2,75 kW, Sucção 235 mba. Reservatório 65 L. Locação diária.	un	R\$ 15,00	1	
CUSTO DE MANUTENÇÃO POR METRO QUADRADO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL					R\$ 27,88

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.7. ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO

Com base nos valores de benefícios e custos obtidos, foi feito o cálculo de fluxo de caixa para o tempo de vida útil das medidas de 30 anos.

Os valores anuais do benefício de valorização imobiliária foram calculados segundo a premissa que os valores são percebidos gradativamente após transpassados o tempo de recorrência, seguindo a regra do Quadro 5.11.

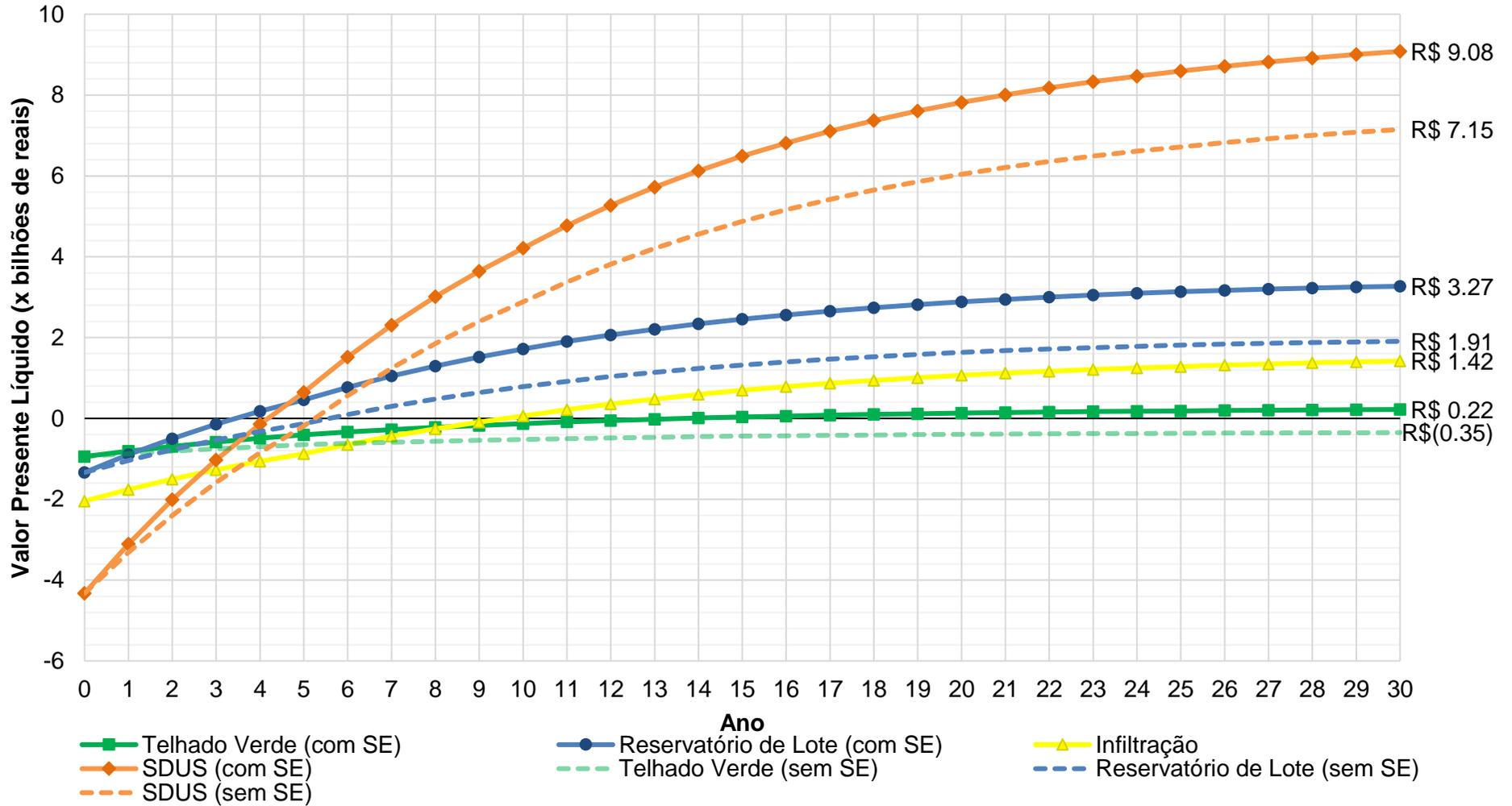
Quadro 5.11 – Método para cálculo do benefício anual de valorização imobiliária.

Faixa de anos	Regra
1 ao 5	Valorização para TR= 1 ano
6 ao 10	Valorização para TR= 5 anos
11 ao 25	Valorização para TR= 10 anos
26 ao 30	Valorização para TR= 25 anos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os valores dos benefícios e custos anuais definidos, foram calculados os valores presentes líquidos anualmente com a taxa de desconto igual a média da taxa Selic para os últimos 20 anos igual a 11,35%, obtendo o resultado apresentado na Figura 5.29.

Figura 5.29 - Resultados de valores presentes líquidos para os cenários com e sem benefícios de serviços ecossistêmicos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os custos e benefícios por área de captação ou implantação das soluções foram compilados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Resultados de custos e benefícios por metro quadrado.

CENÁRIO	CUSTOS (R\$/m ²)		BENEFÍCIOS ANUAIS MÉDIOS (R\$/m ²)		
	INST.	MANUT. (ANUAL)	RED. PREJUÍZO ANUAL ESPERADO	VALORIZAÇÃO IMOBILIÁRIA	SERV. ECOS.
Telhado Verde	R\$ 239,54	R\$ 7,63	R\$ 10,91	R\$ 13,66	R\$ 17,15
Reservatório de Lote	R\$ 158,61	R\$ 4,06	R\$ 14,37	R\$ 37,48	R\$ 19,09
Infiltração	R\$ 326,94	R\$ 12,36	R\$ 23,72	R\$ 64,03	-
SDUS*	R\$ 335,62	R\$ 10,99	R\$ 32,75	R\$ 95,51	R\$ 17,72

* Obtido pela divisão do valor do cenário sobre a soma da área de telhados e espaços livres.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados dos indicadores de valor presente líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Tempo de Retorno e Relação Custo-Benefício considerando ou não os benefícios ecossistêmicos encontram-se na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Resultados dos indicadores de cada cenário.

Cenário	VPL		TIR		Tempo de Retorno (anos)	Relação Custo-Benefício
	Com SE	Sem SE	Com SE	Sem SE		
Telhado Verde	R\$ 221,29 MM		14,4%		13,66	1,18
	-R\$ 349,78 MM		6,0%		-	0,71
Reservatório de Lote	R\$ 3.269,93 MM		38,2%		3,45	3,01
	R\$ 1.908,41 MM		26,9%		5,57	2,17
Infiltração	R\$ 1.421,27 MM		18,6%		9,59	1,53
	R\$ 1.421,27 MM		18,6%		9,59	1,53
SDUS	R\$ 9.081,65 MM		33,3%		4,18	2,64
	R\$ 7.149,06 MM		28,4%		5,25	2,29

Fonte: Elaborado pelo autor.

6. DISCUSSÃO

O presente capítulo visa discutir os resultados obtidos sobre a implantação de soluções de drenagem sustentáveis (SDUS) distribuídos na escala de bacia na bacia do Canal do Mangue.

6.1. TIPOLOGIAS DAS EDIFICAÇÕES

Foi observado que a metodologia de classificação de imagem obteve resultados satisfatórios na classificação dos tipos de telhados. Além dos erros oriundos da defasagem de 6 anos entre o *shapfile* de edificações (2013) e a ortofoto usada na classificação (2019), foram identificados alguns poucos erros em edificações

de telhados de diversos tipos, onde foi considerado o tipo com a ocupação majoritária.

Pelo fato que os polígonos de amostragem dos telhados do tipo “zinco” considerar telhados de cores brancas e claros, essa classe acabou abrangendo telhados de lona, como o telhado do Estádio do Maracanã, sendo a classificação de telhado cerâmica mais assertiva entre as classes pela sua coloração alaranjada de fácil definição.

Conforme Figura 5.4, os telhados de tipo laje foram os que obtiveram a maior cobertura entre os todos os telhados da BCM, representando 45% da área total de telhado. Porém, as edificações de telhado cerâmicos são as edificações de maiores áreas da BCM, seguindo dos telhados “zinco”. Logo, pode-se concluir que as edificações de laje são mais frequentes, por ter edificações de áreas menores e seu somatório ser maior do que os demais tipos. Isso implica que pode ter sido considerado um número elevado de quantidades de orifícios para os telhados verdes.

Em relação à cobertura do solo da BCM, as áreas privadas urbanas, ou seja, as parcelas de terra delimitada por fronteiras legalmente reconhecidas, pertencente a uma pessoa física ou jurídica de direito público ou privado, ocupam parcela relevante da superfície da bacia do Canal do Mangue, conforme Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Valores de cobertura do solo de áreas na BCM.

Tipo	Área	Porcentagem
Edificações	8.428.444,27	19%
Espaços Livres Privados	6.257.301,09	14%
Outros	9.746.734,64	23%
Favelas	3.032.720,00	7%
Áreas de Proteção Ambiental	15.804.000,00	37%
Área total da BCM	43.269.200,00	100%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Se desconsiderarmos as áreas de proteção ambiental e favelas como áreas elegíveis para implantação de medidas compensatórias de drenagem, restam apenas 56% da área da BCM que poderiam ser consideradas para SDUS. Dessa área, as áreas privadas urbanas (edificações + espaços livres privados) representam 60% da área elegível.

Portanto, é fundamental a inclusão dos entes privados no planejamento de drenagem sustentável da bacia. Ressalta-se que nessa breve análise, as áreas

para sistemas de transportes foram consideradas como elegíveis, porém há diversas restrições para implantação de SDUS nessas regiões, seja por conta de excesso de carga de tráfego ou de disponibilidade de espaço; reforçando a hipótese da elevada relevância na consideração das áreas privadas nas políticas públicas de implantações de SDUS.

6.2. MODELAGEM HIDROLÓGICA-HIDRODINÂMICA

Observando a Figura 5.6, os cenários individuais de implantação de SDUS tiveram as medianas de coeficiente de escoamento superficial reduzidos de 0,70 para a faixa de 0,51 a 0,66. Já para o cenário SDUS com reservatórios em série, as reduções foram mais expressivas, ficando em torno de 0,20 a 0,32. Logo, as soluções individuais tiveram uma redução relativa de 6 a 27%, enquanto o cenário SDUS ficou entre 54 e 71%.

Os telhados verdes (TV) demonstraram uma perda de desempenho à medida que a intensidade de chuva aumenta desde o TR de 1 ano. Já os demais cenários, começaram a perder desempenho a partir do TR de 10 anos. O desempenho dos reservatórios de lote (RL) e das medidas de infiltração (IF) foram similares, tal fato pode ser explicado pela elevada capacidade de retenção dos jardins de chuva e pavimentos permeáveis, calculados em 330 L/m² e 90 L/m² para jardins de chuva e pavimento permeável, respectivamente.

Muito importante ressaltar que o dimensionamento dos reservatórios de lote foi baseado na equação do decreto estadual, não levando em conta os volumes para aproveitamento de água pluvial. Há um potencial maior se considerar os volumes para abatimento de vazões e aproveitamento de águas pluviais.

Observa-se também que os limites superiores dos coeficientes de escoamento dos cenários de telhado verde são iguais aos cenários atuais, indicando que em algumas células, os telhados verdes não foram eficazes na redução do coeficiente escoamento. Uma hipótese é que, por conta da baixa capacidade de 35 L/m² de retenção, os telhados verdes podem estar saturando antes da chuva alcançar seu pico, ou por causa do percentual reduzido de área de telhado verde nas células. Já os reservatórios de lote conseguem reduzir os limites superiores até o TR de 50 anos, enquanto as medidas de infiltração reduzem os limites superiores até o TR de 10 anos. Os cenários SDUS completo reduziu em todos

os tempos de recorrência, sendo seus limites superiores equivalentes aos limites inferiores da situação atual.

Já em relação às manchas de inundação, os resultados de telhado verde não tiveram resultados expressivos, com poucas mudanças de faixas de inundação. Já para os reservatórios de lote e medidas de infiltração, houve uma mudança de faixas de inundação mais perceptível. Já o cenário SDUS apresentou uma redução de altura máxima de cheia expressiva para toda a área urbana da BCM.

A elevada diferença de desempenho entre as medidas individuais e combinadas seguindo a prática de desconexão de superfícies permeáveis mostrou o efeito sinérgico do uso dos reservatórios em série, potencializando os benefícios além da soma dos cenários individuais com um pequeno aumento de investimento com as interligações das medidas sustentáveis.

6.3. BENEFÍCIOS DE MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS

Observando os resultados das reduções de prejuízos anuais esperados na Tabela 5.1, é possível observar novamente o efeito sinérgico na interligação das medidas, onde o valor do SDUS representa 135% da soma dos demais cenários, demonstrando novamente o efeito sinérgico de considerar as medidas interligadas entre si.

O cenário de telhados verdes reduziu timidamente a curva de prejuízo-probabilidade. Apesar de terem desempenhos equivalentes no modelo hidrológico, o cenário de infiltração obteve uma melhor redução da curva de prejuízo-probabilidade em comparação com o cenário de reservatório de lote. Uma hipótese para esse fato é a distribuição espacial das soluções, onde os cenários de infiltração reduziram as alturas máximas em regiões mais edificadas do que o cenário de reservatório.

Em relação à avaliação dos impactos das cheias urbanas nos preços dos imóveis na BCM, o fator mais relevante a ser apontado é a fragilidade da representatividade dos valores unitários padrões da planta genérica de valores (PGV) sobre o mercado imobiliário por desconsiderarem os fatores que são considerados no cálculo dos valores venais que podem ser relevantes nos métodos dos preços hedônicos, como a idade da edificação.

Os reduzidos valores de correlação das variáveis de cheias urbanas apresentados na Figura 5.21 evidenciam que as ocorrências das cheias não são fatores relevantes na definição dos valores unitários na BCM.

Neste contexto, foram levantados os impactos percentuais das inundações nos valores dos imóveis obtidos na literatura à título de comparação com os valores obtidos, presentes no Quadro 6.1. Os valores calculados considerando a variável de altura máxima de cheia (HID_NA_05) e proximidade com pontos críticos (HIC_PC) podem ser comparados com as faixas da literatura na Figura 6.1.

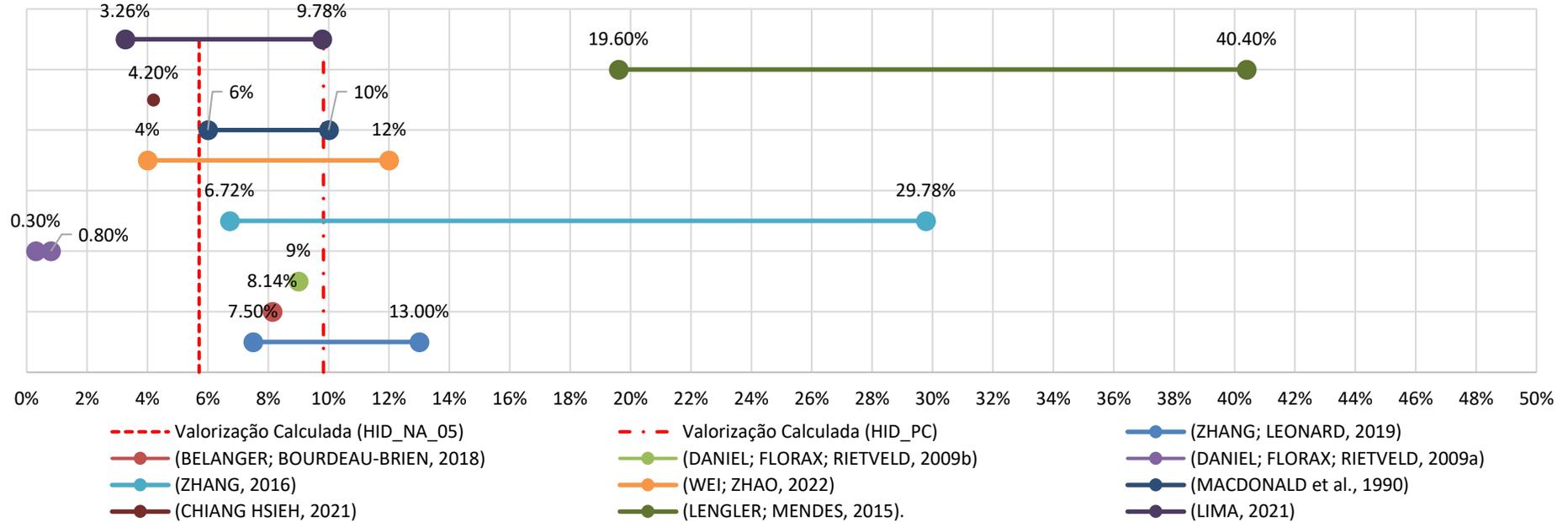
Quadro 6.1 - Pesquisa na literatura sobre impactos marginais de inundações nos preços dos imóveis.

REFERÊNCIA	METODOLOGIA	RESULTADOS	IMPACTOS
(Zhang; Leonard, 2019)	Modelo de preço hedônico e diferença em diferenças. Incluído apenas casas unifamiliares	O desconto nos preços aumentou em mais de 13% após um grande evento de inundação; 8,6 pontos percentuais mais alto ao comparar propriedades na planície de inundação com aquelas 1000-1500 pés fora da planície de inundação. Mediana de -7.5% de impacto em 19 estudos nos EUA.	7.5% - 13%
(Lamond; Proverbs; Hammond, 2010)	Análise de vendas repetidas	Os impactos variaram de nenhum impacto a descontos superiores a 40%; os efeitos foram temporários. Pesquisa na literatura encontrou descontos de 12% e 4%.	40% 4% - 12%
(Belanger; Bourdeau-Brien, 2018)	Modelo de preço hedônico	Reduções significativas surgiram por volta de 2004-2005 coincidindo com mapas de inundação detalhados e políticas de seguro baseadas em risco; efeitos mais fortes após eventos de inundação. Desconto de 8.14% na Inglaterra.	8,14%
(Daniel; Florax; Rietveld, 2009b)	Modelo de preço hedônico	Casas afetadas pelas inundações do rio Meuse em 1993 e 1995 experimentaram uma diminuição permanente de 9%	9%
(Daniel; Florax; Rietveld, 2009a)	Meta-análise de 19 estudos dos EUA	Casas na planície de inundação de 100 anos tinham uma diferença de preço de -0,3% a -0,8%; pequenas diferenças antes e depois dos eventos de inundação	0.3% - 0.8%
(Zhang, 2016)	Regressão quantílica espacial	Valores das propriedades reduzidos dentro da planície de inundação de 100 anos; efeito mais forte nas casas de menor valor. Impactos variando de 6.72 (casas de preços baixos), 15.26% (preços médios) e 29.78% (preços altos)	6.72% - 29.78%
(Beltrán; Maddison; Elliott, 2019)	Modelo de vendas repetidas	Redução de 24,9% após inundações no interior; redução de 21,1% após inundações costeiras; efeitos duraram 5-7 anos para propriedades de menor valor	21,1% - 24,9%
(Wei; Zhao, 2022)	Modelo Durbin Espacial (SDM).	Terrenos com alto risco de inundação sofreram um desconto de 8,62% no preço (valor obtido pelo SDM). Pesquisa na literatura de trabalhos com Método Diferença em Diferenças indica descontos entre 20%-32% após eventos e desaparecem após 4 a 10 anos. Pesquisa na literatura indica descontos típicos de 4 a 12%	8,62% 4% - 12%
(Fridgen; Shultz, 1991)	Modelo de preço hedônico	Casas em áreas de inundação de 100 anos tiveram redução média de US\$ 10.241 após uma grande enchente em 1997.	-
(Hallstrom; Smith, 2005)	Modelo de preço hedônico	Desconto nos preços de casas localizadas em zonas de risco de inundação aumentou entre 6% e 10% após um grande furacão.	6% - 10%
(Macdonald <i>et al.</i> , 1990)	Modelo de preço hedônico	Propriedades em zonas de risco de inundação têm um valor de mercado significativamente menor, correspondendo ao valor capitalizado dos prêmios de seguro.	6%- 8%
(Troy; Romm, 2004)	Modelo de preço hedônico	Casas em áreas de risco de inundação foram vendidas com um desconto de 4,2% em comparação com casas fora dessas áreas após a aprovação da lei AB 1195.	4,2%
(Chiang Hsieh, 2021)	Modelo de regressão ponderada geograficamente	O efeito do risco de inundação nos preços das casas é significativo tanto antes quanto depois da divulgação de mapas de risco de inundação.	
(Harrison; T. Smersh; Schwartz, 2001)	Modelo de preço hedônico	Casas localizadas em zonas de inundação vendem por preços inferiores às casas comparáveis fora dessas áreas.	
(Meldrum, 2016)	Modelo de preço hedônico e <i>matching</i> não paramétrico	Desconto de preço significativo para condomínios em áreas de inundação, mas não para propriedades independentes.	

REFERÊNCIA	METODOLOGIA	RESULTADOS	IMPACTOS
(Lima; Souza, 2021)	Modelo de preços hedônicos. Levantamento por entrevista.	Descontos de 11.8% nos preços dos imóveis para Maceió e 2.4% em Paulo Jacinto.	
(Lengler; Mendes, 2015).	Preços Hedônicos em Porto Alegre	Terrenos com alagamentos com TR de 2 a 10 anos tem impacto de 40.43% sobre o imóvel. Para TR superior a 10 anos, o impacto é de 19.62%.	19.6% - 40.4%
(Lima, 2021)	Preços Hedônicos com 586 dados de anúncios de propriedades comerciais. Dados de risco a inundação do CPRM.	Em Belém, verifica-se um padrão semelhante de desvalorização, de 3,26%, 6,52% e 9,78% do valor dos aluguéis conforme maior a suscetibilidade a inundação da localização da propriedade.	3,26% - 9,78%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.1 – Comparação gráfica dos valores calculados com as faixas da literatura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo apresentado no Quadro 6.1, grande parte dos trabalhos que avaliaram os impactos marginais das inundações sobre os preços dos imóveis variam em 4% a 12%, corroborando também com a pesquisa da literatura feita por Wei; Zhao (2022) e Lamond, Proverbs e Hammond (2010). O impacto marginal utilizado no trabalho (5,71%) mostrou ser um valor conservador em comparação aos valores da literatura. A valorização encontrada pela variável de pontos críticos mostrou boa aderência às faixas da literatura, tendo um potencial de ser representativo.

Vale salientar que a valorização calculada é função da redução da altura máxima de inundação, diferentemente dos trabalhos apresentados, os quais grande maioria avaliaram a presença ou não de risco.

Dentre os benefícios de manejo de águas pluviais, o benefício de valorização imobiliária foi o mais relevante para todos os cenários, exceto para o telhado verde, o qual foi os benefícios de serviços ecossistêmicos. Os benefícios de valorização corresponderam à 32,7%, 52,8%, 73,0% e 65,4% para os cenários TV, RL, IF e SDUS, respectivamente.

6.4. BENEFÍCIOS DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS

Com base na Tabela 5.11, os benefícios de serviços ecossistêmicos (SE) mostraram ser superiores à redução de prejuízos anuais esperados (PAE), comumente usados nas avaliações custos-benefícios de projetos de drenagem urbana. No caso do cenário de telhados verdes, os benefícios de SE foram 1,57 maiores que os benefícios de redução de PEA. Já para o cenário de reservatórios de lote, foram 1,33 vezes. Os benefícios SE representaram 41,1%, 26,9% e 12,1% do total dos benefícios para os cenários de telhado verde, reservatório de lote e SDUS, respectivamente.

Com base na Figura 5.28 e na Tabela 5.12, a contabilização dos benefícios de serviços ecossistêmicos mostrou ser decisivo nos indicadores dos telhados verdes. A consideração dos benefícios alterou a situação de nunca se pagar no horizonte de 30 anos para o tempo de retorno do investimento em 13 anos.

Os benefícios de SE corresponderam a 41,1%, 26,9% e 12,1% para os cenários de TV, RL e SDUS, respectivamente.

6.5. ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO

Com base na Tabela 5.12, os valores de taxa interna de retorno considerando benefícios de SE foram bastante atrativos, variando de 14,4% para TV a 38,2% para RL. Os resultados do cenário SDUS foram reduzidos pelos cenários de IF e TV, por apresentarem as menores relações custo-benefício.

De modo geral, o cenário de RL foi o que apresentou melhor resultado, por apresentar o investimento inicial menor; reduzida manutenção; maiores TIR e relação custo-benefício; e tempos de retornos reduzidos.

A análise custo-benefício do presente trabalho avaliou os aspectos econômicos de implantação de SDUS na escala da bacia como um todo. Porém, é importante salientar a perspectiva dos benefícios perante entes públicos e privados.

Os benefícios de serviços ecossistêmicos considerados no trabalho são benefícios exclusivos aos entes privados e podem ser percebidos de imediato.

Já os benefícios de valorização imobiliária têm como destino os entes privados, com o potencial de retorno para os entes públicos por meio de Imposto sobre a Propriedade Territorial Urbana (IPTU), com alíquota entre 1% a 3% do valor do imóvel para o Rio de Janeiro, e de Imposto de Transferência de Bens Imóveis (ITBI), com alíquota de 3% do valor do imóvel. Para o ente privado, a valorização imobiliária dependerá da percepção e comunicação da redução do risco de cheias, podendo custar um certo tempo para começarem a ser percebidos. Já em relação ao ente público, dependerá também da atualização cadastral, que geralmente é defasada.

Os benefícios de redução de PEA podem ser percebidos tanto por entes públicos e privados ao considerar edificações públicas e privadas.

A delimitação da parcela do ente público é essencial para a viabilidade econômica de políticas públicas de incentivo a medidas de desenvolvimento de baixo impacto por parte dos entes privados. Já a delimitação da parcela do ente privado é crucial para políticas de comunicação, visando aumentar a percepção da população sobre os potenciais benefícios econômicos diretos e imediatos.

6.6. LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A principal limitação do trabalho foi a ausência de dados referentes ao mercado imobiliário da cidade do Rio de Janeiro. Os dados públicos mais próximos aos valores de mercado são os dados de ITBI, porém os dados encontram-se agregados por logradouro, impossibilitando sua definição espacial com precisão que o método requer. Com sugestão para trabalhos futuros, sugere-se requerer oficialmente os dados agregados por grade à Secretaria Municipal da Fazenda, incluindo a variação temporal. Assim, é possível aplicar métodos como diferença-em-diferenças e vendas repetidas. Além disso, sugere-se extrair dados do mercado imobiliário de websites por meio de *webscrapping*.

Diversos outros benefícios não foram considerados nesse trabalho, como a redução de custo em implantação de infraestrutura cinza, melhoria da qualidade do ar pelos telhados verdes e jardins de chuva, benefícios com agricultura urbana, redução de ilha de calor e benefícios relacionados a sequestro de carbono. Sugere-se para trabalhos futuros considerar os benefícios tanto diretos quanto indiretos. Por exemplo, o aproveitamento de água de chuva reduz o consumo de água potável, que tem uma pegada de carbono associada no seu processo de tratamento e distribuição.

Outras limitações são: a defasagem dos *shapfiles* de edificações com a ortofoto usada para classificação de imagem, que desconsiderou novas edificações na BCM; o valor de transmitância térmica considerada do ecotelhado foi obtida com base de um modelo diferente de telhado verde, porém espera-se que suas diferenças sejam reduzidas.

Sugere-se para trabalhos futuros comparar os indicadores de custo-benefício entre a combinação interligada das soluções de drenagem sustentáveis e desconectadas a fim de avaliar o efeito de sinergia identificado nesse trabalho.

Outra sugestão é delimitar os benefícios entre entes públicos e privados para lançar luz sobre políticas públicas de incentivo, como IPTU Verde, a fim de avaliar os custos e benefícios destas políticas.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo elaborar uma análise custo-benefício da aplicação de sistemas de drenagem urbana sustentáveis (SDUS) em lotes

distribuídos pela Bacia do Canal do Manguê (BCM), da cidade do Rio de Janeiro, considerando os benefícios de serviços ecossistêmicos.

Foram considerados três alternativas de SDUS: telhados verdes (TV), reservatórios de lote (RL), jardim de chuva (JC) e pavimentos permeáveis (PP). Foram construídos quatro cenários de intervenções: apenas de TV, apenas de RL, de Infiltração (IF) (JC + PP) e o cenário SDUS, combinando todas as intervenções com a interconexão dos TV, RL e JC.

Os benefícios considerados foram quatro: benefício de redução do prejuízo anual esperado causado pelas cheias urbanas, valorização imobiliária dos imóveis residenciais pela redução das cheias, economia de energia elétrica por refrigeração de ambientes internos e de economia no aproveitamento de água de chuva.

A primeira etapa da metodologia consistiu em delimitar as áreas elegíveis de implantação das alternativas de SDUS a fim de fazer uma análise conservadora, considerando a implantação de TV extensivos em telhados de tipo laje, adotando a premissa que seriam mais adequados a receber a sobrecarga de peso, e delimitando os espaços livres para implantação dos JC e PP.

Considerando os telhados do tipo laje como áreas elegíveis para TV, a BCM demonstrou alto potencial de aplicações dessas medidas por ter 45% dos telhados da bacia do tipo laje. Além disso, as áreas de edificações e espaços livres privados corresponderam à 34% da área da bacia.

A segunda etapa consistiu em avaliar as reduções nas manchas de inundação dos cenários na BCM. Para isso foi empregado um modelo hidrológico a parte do modelo hidrodinâmico baseado em reservatórios a fim de simular as saturações das medidas, em vez de tratá-las como reduções do coeficiente de escoamento, e também considerar o efeito da interligação das soluções. Assim, foi definida a precipitação efetiva de todas as células e inseridas como entrada no modelo hidrodinâmico.

O cenário de TV mostrou baixo desempenho nas reduções das manchas de inundações. Dois fatores podem justificar tal fato: (1) a capacidade do ecotelhado de 35 L/m² é muito pequena em comparação com valores de referência que variam entre 38 a 135 L/m², podendo ser maiores em telhados intensivos de

grande porte; (2) a área elegível de telhado verde é muito reduzida, já que representa 45% da área de telhados. Já os cenários de IF e RL tiveram desempenhos similares na redução da mancha de inundação e superiores ao TV. O cenário SDUS mostrou ter impacto significativa na redução das manchas de inundações para toda a área urbana da bacia.

A terceira etapa consistiu em definir os benefícios. Para calcular os benefícios de valorização imobiliária, foi necessário aplicar o método de preços hedônicos para avaliar os impactos das cheias nos preços dos imóveis. Foram efetuados diversos testes para regressões lineares múltiplas e modelos de autorregressão espaciais.

Concluiu-se que a cada metro de altura máxima de cheia para tempos de recorrências de 5 anos, há um impacto marginal de 5,71% sobre os preços dos imóveis. Além disso, há uma indicação de desvalorização imobiliária de imóveis dentro do raio de 800 metros, com impactos marginais obtidos variando de 2,15% a 9,83%. Ressalta-se que o uso dos dados de valores unitários padrões é uma fragilidade do método, sendo recomendado usar dados do mercado imobiliário.

A última etapa consistiu na elaboração da análise custo-benefício. Os resultados de TV mostraram que a consideração dos serviços ecossistêmicos é determinante em sua viabilidade financeira. De modo geral, os valores de taxa interna de retorno demonstraram ser atrativos. O tempo de retorno (*payback*) se limitou a quase 14 anos, ficando majoritariamente entre 3 a 9 anos.

De modo geral, a valorização imobiliária demonstrou ser os maiores benefícios. Já os benefícios ecossistêmicos foram maiores do que a redução do prejuízo anual esperado para os cenários individuais de TV e RL. O cenário individual com melhor resultado de análise custo-benefício foi do RL.

Os resultados desse trabalho têm potencial de auxiliar os gestores municipais a justificar investimentos de infraestrutura urbana e avaliar impactos de políticas públicas

Como recomendações para trabalhos futuros, ficam as sugestões a seguir:

- Considerar os diversos outros benefícios ecossistêmicos, principalmente das medidas de infiltração. Considerar também quantificar as reduções

de emissões de carbono a fim de ser um indicador de benefício ambiental, além do econômico;

- Aplicar a metodologia de avaliação dos impactos das cheias nos valores imobiliários com dados do mercado imobiliário, levantando suas características físicas além das ambientais. As características físicas são de elevada importância para o método. Além disso, considerar agregar os dados em grade espacial para simplificação do modelo;
- requerer oficialmente os dados agregados por grade à Secretaria Municipal da Fazenda, incluindo a variação temporal. Assim, é possível aplicar métodos como diferença-em-diferenças e vendas repetidas. Além disso, sugere-se extrair dados do mercado imobiliário de websites por meio de *webscrapping*;
- Considerar a inclinação dos telhados na definição das áreas elegíveis de telhados verdes e aplicar um modelo para cada faixa de telhado.
- Avaliar o cenário de SDUS sem interligação entre as medidas, a fim de avaliar o efeito sinérgico no controle de cheias e na análise custo-benefício;
- Separar a avaliação em benefícios públicos (que geram ganhos aos governos) e privados a fim de subsidiar análises de políticas públicas de incentivo às implantações de SDUS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEP, Associação Brasileira de Empresas e Pesquisa. **Critério de Classificação Econômica Brasil**. [s.l: s.n.]. Disponível em: www.abep.org.

ÁGUAS DO RIO. **Legislação e Tarifas**. 2023. Disponível em: <https://aguasdoriorio.com.br/legislacao-e-tarifas/>. Acesso em: 25 maio. 2024.

ALGAZE, Guillermo. **Ancient Mesopotamia at the Dawn of Civilization**. [s.l.] : University of Chicago Press, 2008. v. 47 DOI: 10.7208/chicago/9780226013787.001.0001. Disponível em: <https://www.bibliovault.org/BV.landing.epl?ISBN=9780226013787>.

ANDRÉS-DOMÉNECH, Ignacio; ANTA, Jose; PERALES-MOMPARLER, Sara; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, Jorge. Sustainable Urban Drainage Systems in Spain: A Diagnosis. **Sustainability**, [S. l.], v. 13, n. 5, p. 2791, 2021. DOI: 10.3390/su13052791. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/5/2791>.

ANSELIN, Luc. **Spatial Econometrics: Methods and Models**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1988. v. 4 DOI: 10.1007/978-94-015-7799-1. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-94-015-7799-1>.

ARRIGHI, Chiara; PREGNOLATO, Maria; CASTELLI, Fabio. Indirect flood impacts and cascade risk across interdependent linear infrastructures. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 21, n. 6, p. 1955–1969, 2021. DOI: 10.5194/nhess-21-1955-2021. Disponível em: <https://nhess.copernicus.org/articles/21/1955/2021/>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte 2: Parâmetros de conforto térmico**. [s.l: s.n.].

BALLARD, Bridget Woods; WILSON, Steve; UDALE-CLARKE, Helen; ILLMAN, Sue; SCOTT, Tamasine; ASHLEY, Richard; KELLAGHER, Richard. **The SuDS Manual**. London: CIRIA, 2015.

BELANGER, Philippe; BOURDEAU-BRIEN, Michael. The impact of flood risk on the price of residential properties: the case of England. **Housing Studies**, [S. l.], v. 33, n. 6, p. 876–901, 2018. DOI: 10.1080/02673037.2017.1408781.

BELTRÁN, Allan; MADDISON, David; ELLIOTT, Robert. The impact of flooding on property prices: A repeat-sales approach. **Journal of Environmental Economics and Management**, [S. l.], v. 95, p. 62–86, 2019. DOI: 10.1016/j.jeem.2019.02.006.

BUI, Nam; WEN, Le; SHARP, Basil. House Prices and Flood Risk Exposure: An Integration of Hedonic Property Model and Spatial Econometric Analysis. **Journal of Real Estate Finance and Economics**, [S. l.], 2022. DOI: 10.1007/s11146-022-09930-z.

CARVALHO, Guilherme Furtado; KRAUS JUNIOR, Werner; KRETZER, Geruza; SOUZA, Eduardo Leite; OTTO, Daniela. ENCADEAMENTO DE VIAGENS PEDONAIS NO TRANSPORTE PÚBLICO INTERMUNICIPAL: O CASO DA REGIÃO METROPOLITANA DE FLORIANÓPOLIS. *Em: XXXI CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTE DA ANPET 2017, Recife. Anais [...]. Recife p. 2904–2914. Disponível em: <https://observatoriodamobilidadeurbana.ufsc.br/wp-content/uploads/2019/04/CARVALHO-G.-KRAUS-W.-KRETZER-G.-TEIXEIRA-K.-SOUZA-E.L.-OTTO-D.-Encadeamento-de-viagens-pedonais-no-transporte-pu%CC%81blico-intermunicipal-O-caso-da-Regia%CC%83o-Metropolitana-de-Floriano%CC%81polis.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2024.*

CARVALHO JUNIOR, Pedro Humberto Bruno. Situação atual do IPTU no Rio de Janeiro e sua possível reforma. **Cadernos do Desenvolvimento Fluminense**, [S. l.], v. 1, p. 33, 2013.

CEPED UFSC. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010: volume Rio de Janeiro**. Florianópolis, SC.

CHIANG HSIEH, Lin-Han. Is it the flood, or the disclosure? An inquiry to the impact of flood risk on residential housing prices. **Land Use Policy**, [S. l.], v. 106, p. 105443, 2021. DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105443.

CHURCH, John A.; WHITE, Neil J. Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. **Surveys in Geophysics**, [S. l.], v. 32, n. 4–5, p. 585–602, 2011.

DOI: 10.1007/s10712-011-9119-1. Disponível em:
<http://link.springer.com/10.1007/s10712-011-9119-1>.

CNT. **The Value of Green Infrastructure. A Guide to Recognizing Its Economic, Environmental and Social Benefits**. Chicago. Disponível em:
<https://www.cnt.org/publications/the-value-of-green-infrastructure-a-guide-to-recognizing-its-economic-environmental-and>.

CONGEDO, Luca. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. **Journal of Open Source Software**, [S. l.], v. 6, n. 64, p. 3172, 2021. DOI: 10.21105/joss.03172. Disponível em: <https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.03172>.

COR RIO - Centro de Operações e Resiliência do Rio. [s.d.]. Disponível em:
<https://cor.rio/>. Acesso em: 16 mar. 2024.

CRAWFORD, Sarah E. *et al.* Remobilization of pollutants during extreme flood events poses severe risks to human and environmental health. **Journal of Hazardous Materials**, [S. l.], v. 421, p. 126691, 2022. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126691. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389421016563>.

CRED. **EM-DAT Database**. 2021. Disponível em: <https://www.emdat.be/>. Acesso em: 12 mar. 2021.

CURTIS, Ian A. Valuing ecosystem goods and services: a new approach using a surrogate market and the combination of a multiple criteria analysis and a Delphi panel to assign weights to the attributes. **Ecological Economics**, [S. l.], v. 50, n. 3–4, p. 163–194, 2004. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2004.02.003. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921800904001491>.

DANG, M.; SAMPAIO, M. The potential for rooftop agriculture in the city of Rio de Janeiro: Growing capacity, Food security and Green infrastructure. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S. l.], v. 410, n. 1, p. 012016, 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/410/1/012016. Disponível em:
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/410/1/012016>.

DANIEL, Vanessa E.; FLORAX, Raymond J. G. M.; RIETVELD, Piet. Flooding risk and housing values: An economic assessment of environmental hazard.

Ecological Economics, [S. l.], v. 69, n. 2, p. 355–365, 2009. a. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2009.08.018.

DANIEL, Vanessa E.; FLORAX, Raymond J. G. M.; RIETVELD, Piet. Floods and Residential Property Values: A Hedonic Price Analysis for the Netherlands. **Built Environment**, [S. l.], v. 35, n. 4, p. 563–576, 2009. b. DOI: 10.2148/benv.35.4.563.

DELGADO DE CARVALHO, Carlos. **História da Cidade do Rio de Janeiro**. 2. ed. Rio de Janeiro: Secretaria Municipal de Cultura, 1990. Disponível em: https://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/4204210/4101378/historia_cidade_rio_janeiro.pdf. Acesso em: 9 mar. 2024.

DENG, Xiangzheng; LIU, Jiyuan; MA, Enjun; JIANG, Li; YU, Rui; JIANG, Qun'ou; ZHAO, Chunhong. **Impacts of Land-use Change on Ecosystem Services**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. DOI: 10.1007/978-3-662-48008-3. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-48008-3_5.

DICIONÁRIO Ilustrado Tupiguarani. [s.d.]. Disponível em: <https://www.dicionariotupiguarani.com.br/>. Acesso em: 9 mar. 2024.

DJORDJEVIĆ, S.; PRODANOVIĆ, D.; MAKSIMOVIĆ, Č. An approach to simulation of dual drainage. **Water Science and Technology**, [S. l.], v. 39, n. 9, p. 95–103, 1999. DOI: 10.2166/wst.1999.0451. Disponível em: <http://iwaponline.com/wst/article-pdf/39/9/95/37531/95.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2021.

ECOTELHADO. **Sistema Modular Alveolar Grelhado**. Porto Alegre.

EHRIG-PAGE, J. C. Evaluating Methods for Downloading OpenStreetMap Data. **Cartographic Perspectives**, [S. l.], v. 2020, n. 95, p. 42–49, 2020. DOI: 10.14714/CP95.1633. Disponível em: <https://cartographicperspectives.org/index.php/journal/article/view/1633>.

ELLIS, J. B.; DEUTSCH, J. C.; MOUCHEL, J. M.; SCHOLES, L.; REVITT, M. D. Multicriteria decision approaches to support sustainable drainage options for the treatment of highway and urban runoff. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 334–335, p. 251–260, 2004. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.04.066. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969704003870>.

ERIKA ALDISA. **IS415 Geospatial Analytics and Application**. 2020.

FELIPE-LUCIA, María R.; COMÍN, Francisco A.; ESCALERA-REYES, Javier. A framework for the social valuation of ecosystem services. **AMBIO**, [S. l.], v. 44, n. 4, p. 308–318, 2015. DOI: 10.1007/s13280-014-0555-2. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s13280-014-0555-2>.

FERRAZ, Iara Lima. **O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em comparação ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica**. 2012. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. DOI: 10.11606/D.3.2012.tde-07062013-144209. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-07062013-144209/>.

FLETCHER, Tim D. *et al.* SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, [S. l.], v. 12, n. 7, p. 525–542, 2015. DOI: 10.1080/1573062X.2014.916314. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1573062X.2014.916314>.

FRAGA, João Paulo Rebechi; ARRUDA, Roberto Nonato; GUIMARÃES, Luciana Fernandes; BECKER, Beatriz Rohden; OKUMURA, Celí Kiyomi; OLIVEIRA, Antonio Krishnamurt Beleño De; VERÓL, Aline Pires; MIGUEZ, Marcelo Gomes. Cost-benefit Analysis of Sustainable Drainage Systems (SuDS) Considering Ecosystems Services Benefits: Case of Study of Mangue River Watershed in Rio de Janeiro City, Brazil. *Em*: 2ND LATIN AMERICA CONFERENCE ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF ENERGY, WATER AND ENVIRONMENTAL SYSTEM 2019, **Anais** [...]. [s.l: s.n.] p. 1–19.

FRAGA, João Paulo Rebechi; OKUMURA, Celi Kiyomi; GUIMARÃES, Luciana Fernandes; ARRUDA, Roberto Nonato De; BECKER, Beatriz Rohden; DE OLIVEIRA, Antonio Krishnamurti Beleño; VERÓL, Aline Pires; MIGUEZ, Marcelo Gomes. Cost-benefit analysis of sustainable drainage systems considering ecosystems services benefits: case study of canal do mangue watershed in Rio de Janeiro city, Brazil. **Clean Technologies and Environmental Policy**, [S. l.], v. 24, n. 2, p. 695–712, 2022. DOI: 10.1007/s10098-021-02221-w. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s10098-021-02221-w>. Acesso em: 20 abr. 2022.

FREEMAN III, A. Myrick; HERRIGES, Joseph A.; KLING, Catherine L. **The Measurement of Environmental and Resource Values**. [s.l.] : Routledge, 2014. DOI: 10.4324/9781315780917.

FRIDGEN, Patrick M.; SHULTZ, Steven D. **THE INFLUENCE OF THE THREAT OF FLOODING ON HOUSING VALUES IN FARGO, NORTH DAKOTA AND MOORHEAD, MINNESOTA**. MINNESOTA. Disponível em: file:///C:/Users/OS_GRI~1/AppData/Local/Temp/MicrosoftEdgeDownloads/42cb9c25-0d38-4c94-b2f0-0741fa5d0885/aer417.pdf. Acesso em: 13 jun. 2024.

FRONGIA, Sara; SECHI, Giovanni M.; DAVISON, Mark. Tangible and Intangible Flood damage evaluation. **E3S Web of Conferences**, [S. l.], v. 7, p. 05007, 2016. DOI: 10.1051/e3sconf/20160705007. Disponível em: <http://www.e3s-conferences.org/10.1051/e3sconf/20160705007>.

FUNDAÇÃO COPPETEC. **Execução de concepção e de projetos de obras civis e ações de controle das enchentes na Bacia Hidrográfica do Canal do Mangue**. Rio de Janeiro.

GARCÍA-MONTOYA, Mariana; SENGUPTA, Debalina; NÁPOLES-RIVERA, Fabricio; PONCE-ORTEGA, José María; EL-HALWAGI, Mahmoud M. Environmental and economic analysis for the optimal reuse of water in a residential complex. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 130, p. 82–91, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.109>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615008422>.

GELAPE, Lucas. **crossfire**. [s.d.]. Disponível em: <https://github.com/voltdatalab/crossfire>. Acesso em: 13 abr. 2024.

GOLGHER, André Braz; VOSS, Paul R. How to Interpret the Coefficients of Spatial Models: Spillovers, Direct and Indirect Effects. **Spatial Demography**, [S. l.], v. 4, n. 3, p. 175–205, 2016. DOI: 10.1007/s40980-015-0016-y.

GONÇALVES, Ricardo Franci. **Uso Racional de Água e Energia - Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água**. [s.l.] : ABES, 2009.

Google Maps Platform - Preços. [s.d.]. Disponível em: <https://mapsplatform.google.com/pricing/?hl=pt->

br&_gl=1%2A1j0kmm6%2A_ga%2ANzA3MjMxNTEzLjE3MTEwMzI2MTY.%2A_ga_NRWSTWS78N%2AMTcxMTYzODczOS4zLjEuMTcxMTYzOTU3My4wLjAuMA..#pricing-grid. Acesso em: 27 mar. 2024.

GUEDES, Flávio Leôncio; DUARTE DE AZEVEDO FILHO, Rildo; GONÇALVES DOMINGUES FERREIRA, Flávia; GARRETT AZEVEDO, Flávia. ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS E VANTAGENS ENTRE TELHADOS VERDES E SISTEMAS CONVENCIONAIS DE COBERTURAS. **Revista Eletrônica da Estácio Recife**, [S. l.], v. 5, n. 2, 2020. Disponível em: <https://reer.emnuvens.com.br/reer/article/view/316>.

HALLSTROM, Daniel G.; SMITH, V. Kerry. Market responses to hurricanes. **Journal of Environmental Economics and Management**, [S. l.], v. 50, n. 3, p. 541–561, 2005. DOI: 10.1016/j.jeem.2005.05.002.

HARRISON, David; T. SMERSH, Greg; SCHWARTZ, Arthur. Environmental Determinants of Housing Prices: The Impact of Flood Zone Status. **Journal of Real Estate Research**, [S. l.], v. 21, n. 1–2, p. 3–20, 2001. DOI: 10.1080/10835547.2001.12091045.

HERZOG, Cecilia; FREITAS, Tiago; WIEDMAN, Guilherme. **Soluções Baseadas na Natureza e os Desafios da Água - Acelerando a transição para cidades mais sustentáveis**. Luxemburgo. DOI: doi:10.2777/850594. Disponível em: <http://europa.eu>.

HOLLIS, G. E. The effect of urbanization on floods of different recurrence interval. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 11, n. 3, p. 431–435, 1975. DOI: 10.1029/WR011i003p00431. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/WR011i003p00431>.

HUANG, Guangwei. A Revisit to Impact of Urbanization on Flooding. *Em*: HUANG, Guangwei; SHEN, Zhenjiang (org.). **Urban Planning and Water-related Disaster Management**. Strategies for Sustainability Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 43–56. DOI: 10.1007/978-3-319-90173-2_4. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-90173-2>.

HUBER, Wayne C.; LAI, Fu-hsiung; CLANNON, LaMarr; STOUDEER, Matt. Modeling Concepts for BMP/LID Simulation. *Em*: CRITICAL TRANSITIONS IN WATER AND ENVIRONMENTAL RESOURCES MANAGEMENT 2004, Reston,

VA. **Anais** [...]. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2004. p. 1–11. DOI: 10.1061/40737(2004)35. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/40737%282004%2935>.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

IMAGINERIO. [s.d.]. Disponível em: <https://www.imagnerio.org/>. Acesso em: 12 mar. 2024.

INSTITUTO FOGO CRUZADO. **Ocorrências**. [s.d.]. Disponível em: <https://api.fogocruzado.org.br/docs/endpoint/occurrences>. Acesso em: 13 abr. 2024.

INSTITUTO PEREIRA PASSOS. **O Potencial de Telhados Verdes na Cidade do Rio de Janeiro**. 2020. Disponível em: <https://www.data.rio/apps/9242476f2d794d80b2bf0af26e80cbc9/explore>. Acesso em: 11 jun. 2024.

INSTITUTO PEREIRA PASSOS. **Índice de Progresso Social da Cidade do Rio de Janeiro**. 2022.

INSTITUTO PEREIRA PASSOS. **Data.Rio**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.data.rio/>. Acesso em: 12 mar. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (ORG.). **Climate Change 2013 – The Physical Science Basis**. [s.l.] : Cambridge University Press, 2014. DOI: 10.1017/CBO9781107415324. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781107415324/type/book>.

ISMAIL, Nur Hafizah; ABD KARIM, Mohd Zaini; BASRI, Bakti Hasan. Does Flood Affect Property Values? A Hedonic Analysis of Residential Property Values in Peninsular Malaysia. **Journal of Business Management and Accounting**, [S. l.], v. 4, p. 1–14, 2020. DOI: 10.32890/jbma2014.4.0.8875. Disponível em: <https://e-journal.uum.edu.my/index.php/jbma/article/view/8875>.

JIUSTO, Scott; KENNEY, Macauley. Hard rain gonna fall: Strategies for sustainable urban drainage in informal settlements. **Urban Water Journal**, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 253–269, 2016. DOI: 10.1080/1573062X.2014.991329.

JOHNSON, Daniel; GEISENDORF, Sylvie. Are Neighborhood-level SUDS Worth it? An Assessment of the Economic Value of Sustainable Urban Drainage System Scenarios Using Cost-Benefit Analyses. **Ecological Economics**, [S. l.], v. 158, n. July 2018, p. 194–205, 2019. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2018.12.024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.12.024>.

JOSHI, Prabhat; LEITÃO, Joao Paulo; MAURER, Max; BACH, Peter Marcus. Not all SuDS are created equal: Impact of different approaches on combined sewer overflows. **Water Research**, [S. l.], v. 191, p. 116780, 2021. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116780. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135420313130>.

KAHLE, David; WICKHAM, Hadley. ggmap: Spatial Visualization with ggplot2. **The R Journal**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 144, 2013. DOI: 10.32614/RJ-2013-014.

KOETSE, Mark J.; BROUWER, Roy; VAN BEUKERING, Pieter J. H. Economic valuation methods for ecosystem services. *Em: Ecosystem Services*. [s.l.] : Cambridge University Press, 2015. p. 108–131. DOI: 10.1017/CBO9781107477612.009. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/product/identifiier/CBO9781107477612A013/type/book_part.

KÖHLER, Manfred; POLL, Philipp H. Long-term performance of selected old Berlin greenroofs in comparison to younger extensive greenroofs in Berlin. **Ecological Engineering**, [S. l.], v. 36, n. 5, p. 722–729, 2010. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2009.12.019.

KUMAR, Manasi; KUMAR, Pushpam. Valuation of the ecosystem services: A psycho-cultural perspective. **Ecological Economics**, [S. l.], v. 64, n. 4, p. 808–819, 2008. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2007.05.008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921800907002765>.

KUMAR, Manish; SINGH, R. B.; SINGH, Anju; PRAVESH, Ram; MAJID, Syed Irtiza; TIWARI, Akash. Introduction of Geographic Information System. *Em: Geographic Information Systems in Urban Planning and Management*. 1. ed. [s.l.] : Springer, 2023. p. 3–24. DOI: 10.1007/978-981-19-7855-5_1. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/978-981-19-7855-5_1.

LAMOND, Jessica; PROVERBS, David; HAMMOND, Felix. The Impact of Flooding on the Price of Residential Property: A Transactional Analysis of the UK Market. **Housing Studies**, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 335–356, 2010. DOI: 10.1080/02673031003711543.

LEGESSE, Fekadu; DEGEFA, Sileshi; SOROMESSA, Teshome. Valuation Methods in Ecosystem Services: A Meta-analysis. **World Journal of Forest Research**, [S. l.], v. 1, n. 1, 2022. DOI: 10.33140/WJFR.01.01.01. Disponível em: <https://www.opastpublishers.com/open-access-articles/valuation-methods-in-ecosystem-services-a-metaanalysis.pdf>.

LEKUTHAI, Atthanan; VONGVISESSOMJAI, Suphat. Intangible Flood Damage Quantification. **Water Resources Management**, [S. l.], v. 15, n. 5, p. 343–362, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1014489329348>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1014489329348#citeas>. Acesso em: 14 jun. 2024.

LEGLER, Cristina; MENDES, Carlos André Bulhões. O financiamento do investimento público no sistema de drenagem urbana de águas pluviais no Brasil. **Revista de Desenvolvimento Econômico**, [S. l.], v. 31, n. 17, p. 60–74, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.21452/rde.v17i31.2250>. Disponível em: <https://revistas.unifacs.br/index.php/rde/article/view/2250/2696>.

LIGHT. **Tarifas Baixa Tensão**. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.light.com.br/Documentos%20Compartilhados/Entenda-Conta-Casa-Arquivos-Relacionados/Tarifas%20Baixa%20Tens%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 18 maio. 2024.

LIMA, Diego da Silva; SOUZA, Vladimir Caramori Borges De. AVALIAÇÃO INDIRETA DO DÉFICIT NA DRENAGEM URBANA VIA MODELOS DE PREÇOS HEDÔNICOS . *Em*: XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS 2021, Belo Horizonte. **Anais** [...]. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2021.

LIMA, Gabriel Villas Boas de Amorim. **Influência de inundações no valor de aluguel de imóveis comerciais em Belém, Brasil**. 2021. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

LLOYD, Sara Dorothy; WONG, Tony Hoong Fatt; CHESTERFIELD, Christopher J. Water Sensitive Urban Design - A Stormwater Management Perspective (Industry Report). *Em:* (Cathy Sage, Org.) WATER SENSITIVE URBAN DESIGN - A STORMWATER MANAGEMENT PERSPECTIVE 2002, **Anais** [...]. : Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, 2002. p. 1 – 38.

LOURENÇO, Ianic Bigate; GUIMARÃES, Luciana Fernandes; ALVES, Marina Barroso; MIGUEZ, Marcelo Gomes. Land as a sustainable resource in city planning: The use of open spaces and drainage systems to structure environmental and urban needs. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 276, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123096.

MACDONALD, Don N.; WHITE, Harry L.; TAUBE, Paul M.; HUTH, William L. Flood Hazard Pricing and Insurance Premium Differentials: Evidence from the Housing Market. **The Journal of Risk and Insurance**, [S. l.], v. 57, n. 4, p. 654, 1990. DOI: 10.2307/252950. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/252950?origin=crossref>.

MACKLIN, Mark G.; LEWIN, John. The rivers of civilization. **Quaternary Science Reviews**, [S. l.], v. 114, p. 228–244, 2015. DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.02.004. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0277379115000608>.

MAGALHÃES, Cristiane Ramos. **BACIA HIDROGRÁFICA COMO REFERÊNCIA DE PLANEJAMENTO E EXPANSÃO URBANA PARA AS CIDADES NO SÉCULO XXI**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli1030.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2024.

MARDIN, Rifai; SHEN, Zhenjiang. Integrated Criteria for Flood Disaster Mitigation in Indonesian Urban Masterplan; Housing and Settlement Suitability Case in Palu Urban Masterplan. *Em:* HUANG, Guangwei; SHEN, Zhenjiang (org.). **Urban Planning and Water-related Disaster Management**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 127–153. DOI: 10.1007/978-3-319-90173-2_8. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-90173-2_8.

MARTÍNEZ-GOMARIZ, Eduardo; GÓMEZ, Manuel; RUSSO, Beniamino; SÁNCHEZ, Pablo; MONTES, Josep-Anton. Methodology for the damage assessment of vehicles exposed to flooding in urban areas. **Journal of Flood Risk Management**, [S. l.], v. 12, n. 3, 2019. DOI: 10.1111/jfr3.12475. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfr3.12475>.

MARTINS DE SOUSA, Matheus *et al.* ATUALIZAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DO MODELO DE CHEIAS DA BACIA DO CANAL DO MANGUE, RIO DE JANEIRO-RJ. *Em*: XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS 2021, **Anais [...]**. [s.l: s.n.]

MAY, Simone. **Estudo da viabilidade do aproveitamento de água de chuva para consumo não potável em edificações**. 2004. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2004.

MCPHEARSON, Timon; KABISCH, Nadja; FRANTZESKAKI, Niki. **Nature-based solutions for cities**. 1. ed. Northampton: Edward Elgar Publishing, 2023.

MELDRUM, James R. Floodplain Price Impacts by Property Type in Boulder County, Colorado: Condominiums Versus Standalone Properties. **Environmental and Resource Economics**, [S. l.], v. 64, n. 4, p. 725–750, 2016. DOI: 10.1007/s10640-015-9897-x.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. **Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

MIGUEZ, Marcelo Gomes. **Modelo Matemático de Células de escoamento para Bacias Urbanas**. 2001. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2001.

MIGUEZ, Marcelo Gomes; MAGALHÃES, Luiz Paulo Canedo De. Urban Flood Control, Simulation and Management - an Integrated Approach. *Em*: DE PINA FILHO, Armando Carlos; DE PINA, Aloisio Carlos (org.). **Methods and Techniques in Urban Engineering**. Rijeka: InTech, 2010. DOI: 10.5772/9574. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/methods-and-techniques-in-urban-engineering/urban-flood-control-simulation-and-management-an-integrated-approach>.

MIGUEZ, Marcelo Gomes; PERES BATTEMARCO, Bruna; MARTINS DE SOUSA, Matheus; MOURA REZENDE, Osvaldo; PIRES VERÓL, Aline; GUSMAROLI, Giancarlo. Urban Flood Simulation Using MODCEL—An Alternative Quasi-2D Conceptual Model. **Water**, [S. l.], v. 9, n. 6, p. 445, 2017. DOI: 10.3390/w9060445. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2073-4441/9/6/445>.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and Human Well-being: Synthesis**. Washington, DC: Island Press/Center for Resource Economics, 2005. Disponível em: <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>.

MILLWARD, Hugh; SPINNEY, Jamie; SCOTT, Darren. Active-transport walking behavior: destinations, durations, distances. **Journal of Transport Geography**, [S. l.], v. 28, p. 101–110, 2013. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2012.11.012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096669231200289X>.

MORISHITA, Claudio; SORGATO, Marcio José; TRIANA, Maria Andrea; MARINOSKI, Deivis Luis; LAMBERTS, Roberto. **Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas (v.4)**. Florianópolis. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br>.

NAGEM, Fernanda Raquel Maximiano. **Avaliação Econômica dos Prejuízos Causados pelas Cheias Urbanas**. 2008. Msc. Thesis - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2008.

NASCIMENTO, E. A. A.; SANT'ANA, D. Caracterização dos Usos-Finais do Consumo de Água em Edificações do Setor Hoteleiro de Brasília. **Revista de Arquitetura IMED**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 156–167, 2014. DOI: 10.18256/2318-1109/arqimed.v3n2p156-167. Disponível em: <http://www.bibliotekevirtual.org/index.php/2013-02-07-03-02-35/2013-02-07-03-03-11/1056-arqimed/v03n02/11212-caracterizacao-dos-usos-finais-do-consumo-de-agua-em-edificacoes-do-setor-hoteleiro-de-brasilia.html>.

NGUYEN, Thu Thuy; NGO, Huu Hao; GUO, Wenshan; WANG, Xiaochang C.; REN, Nanqi; LI, Guibai; DING, Jie; LIANG, Heng. Implementation of a specific urban water management - Sponge City. **Science of The Total Environment**,

[S. I.], v. 652, p. 147–162, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.168. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969718340518>.

NITHILA, Arna Nishita; SHOME, Paromita; ISLAM, Ishrat. Waterlogging induced loss and damage assessment of urban households in the monsoon period: a case study of Dhaka, Bangladesh. **Natural Hazards**, [S. I.], v. 110, n. 3, p. 1565–1597, 2022. DOI: 10.1007/s11069-021-05003-1. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11069-021-05003-1>.

OICS, Observatório de Inovação para Cidades Sustentáveis. **Catálogo Brasileiro de Soluções Baseadas na Natureza**. [s.d.]. Disponível em: <https://catalogo-sbn-oics.cgee.org.br/>. Acesso em: 13 jul. 2024.

OKUMURA, Celí Kiyomi. **ESTUDO DE SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS NO EDIFÍCIO E NO LOTE, COM VISTAS À GESTÃO HÍDRICA EFICIENTE EM BACIAS URBANAS CONSOLIDADAS: A SUB-BACIA DO RIO TRAPICHEIROS, RIO DE JANEIRO**. 2022. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

OLIVEIRA, Yasmine Simões De; FILHO, Reynaldo Furtado Faria. Uso de Ferramentas de Geoprocessamento para Análise dos Raios de Abrangência dos Equipamentos Públicos Comunitários de Educação no Município de Rio Paranaíba-MG. **ACTA Geográfica**, [S. I.], v. 16, n. 41, p. 236–259, 2022. Disponível em: <https://revista.ufr.br/actageo/article/view/6537/3782>. Acesso em: 8 jun. 2024.

OPENSTREETMAP FOUNDATION. **OpenStreetMap Fountation**. [s.d.]. Disponível em: <https://osmfoundation.org/>. Acesso em: 13 abr. 2024.

OUBENNACEUR, Khalid; CHOKMANI, Karem; NASTEV, Miroslav; LHISSOU, Rachid; ALEM, Anas El. Flood risk mapping for direct damage to residential buildings in Quebec, Canada. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [S. I.], v. 33, p. 44–54, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.09.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212420918306447>.

PCRJ, Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro. **Sistema de Custos de Obra (SCO-RIO)**. 2024. Disponível em: <https://www2.rio.rj.gov.br/sco/>. Acesso em: 25 maio. 2024.

PDMAP - Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Rio de Janeiro - Relatório Síntese. . Rio de Janeiro. Disponível em: http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/8940582/4249724/RA0027.RA.3775_RELATORIOSINTESEPDMAP.pdf. Acesso em: 15 mar. 2024.

PINI. Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO). 13. ed. São Paulo : Editora PINI, 2010.

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. **SISCOB - Sistema de Acompanhamento de Obras e Serviços.** 2006. Disponível em: <http://www2.rio.rj.gov.br/sco/>.

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. LEI Nº 6250 DE 28 DE SETEMBRO DE 2017. Altera a alíquota padrão do ITBI, promove alterações e inserções de dispositivos relativos a IPTU e TCL, inclusive na Planta Genérica de Valores - PGV de imóveis, e dá outras providências. . 28 set. 2017.

PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO. **Instruções Técnicas para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamento Hidráulico de Sistemas de Drenagem Urbana.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/8940582/4244719/InstrucaoTecnicaREVI SAO1.pdf>.

PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO. **Informativo Valor Venal - IPTU 2023.** Rio de Janeiro. Disponível em: <https://carioca.rio/wp-content/uploads/2022/01/Previa-de-INFORMATIVO-Valor-Venal-2023.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2024.

Projeteee - Componentes Construtivos. [s.d.]. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteee/componentes-construtivos/#pisos-e-coberturas>. Acesso em: 12 jul. 2024.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS.** [s.d.]. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/. Acesso em: 27 mar. 2024.

RADINJA, Matej; COMAS, Joaquim; COROMINAS, Lluís; ATANASOVA, Nataša. Multi-criteria Evaluation of Sustainable Urban Drainage Systems. *Em:* [s.l: s.n.]. p. 269–274. DOI: 10.1007/978-3-319-99867-1_45. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-99867-1_45.

RAZZAGHMANESH, M.; BEECHAM, S.; BRIEN, C. J. Developing resilient green roofs in a dry climate. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 490, p. 579–589, 2014. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.05.040.

REZENDE, Osvaldo Moura. **Análise Quantitativa da Resiliência a Inundações para o Planejamento Urbano: Caso da Bacia do Canal do Manguê no Rio de Janeiro**. 2018. Tese (Doutorado) - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/11407/1/OsvaldoMouraRezende.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2024.

RIBEIRO, Pedro Schreiber. **RESILIÊNCIA HÍDRICA: O POTENCIAL DE REÚSO DE ÁGUA DE CHUVA NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciências Ambientais) - Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <https://siurb.rio/portal/sharing/rest/content/items/b6a3f61bdf2a446daab14c40797df5e9/data>. Acesso em: 11 jun. 2024.

RIO DE JANEIRO (MUNICÍPIO). PROJETO DE LEI COMPLEMENTAR Nº 39/1999. . 1999.

RIO DE JANEIRO (MUNICÍPIO). LEI COMPLEMENTAR Nº 73, DE 29 DE JULHO DE 2004. . 2004.

ROSSMAN, Lewis A. **Storm Water Management Model Reference Manual Volume III-Water Quality Office of Research and Development Water Supply and Water Resources Division**. Cincinnati. Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>. Acesso em: 12 jun. 2024.

RSTUDIO DEVELOPMENT TEAM. **RStudio: Integrated Development for R**. [s.d.]. Disponível em: <http://www.rstudio.com/>. Acesso em: 27 mar. 2024.

SALGADO, João Carlos Mattoso. **Avaliação Econômica de Projetos de Drenagem e de Controle de Inundações em Bacias Urbanas**. 1995. Master - UFRJ, [S. l.], 1995.

SAVI, Adriane Cordone. **Telhados Verdes: Análise Comparativa de Custo com Sistema**. 2012. Spec. Thesis - Universidade Tecnológica Federal do

Paraná, [S. l.], 2012. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/17364/2/CT_CECONS_II_2012_01.pdf. Acesso em: 30 abr. 2024.

SCHOBBER, Bernhard; HAUER, Christoph; HABERSACK, Helmut. <sc>Floodplain</sc> losses and increasing flood risk in the context of recent historic land use changes and settlement developments: Austrian case studies. **Journal of Flood Risk Management**, [S. l.], v. 13, n. 3, 2020. DOI: 10.1111/jfr3.12610.

SETO, Karen C.; PARNELL, Susan; ELMQVIST, Thomas. A Global Outlook on Urbanization. Em: **Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. p. 1–12. DOI: 10.1007/978-94-007-7088-1_1. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-94-007-7088-1_1.

SHAFIQUE, Muhammad; KIM, Reeho; KYUNG-HO, Kwon. Green Roof for Stormwater Management in a Highly Urbanized Area: The Case of Seoul, Korea. **Sustainability**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 584, 2018. DOI: 10.3390/su10030584. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/3/584>.

SHKARUBA, Anton; SKRYHAN, Hanna; LIKHACHEVA, Olga; KATONA, Attila; MARYSKEVYCH, Oksana; KIREYEU, Viktor; SEPP, Kalev; SHPAKIVSKA, Iryna. Development of sustainable urban drainage systems in Eastern Europe: an analytical overview of the constraints and enabling conditions. **Journal of Environmental Planning and Management**, [S. l.], v. 64, n. 13, p. 2435–2458, 2021. DOI: 10.1080/09640568.2021.1874893. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09640568.2021.1874893>.

SHUSTER, William D.; GARMESTANI, Ahjond S. Adaptive exchange of capitals in urban water resources management: An approach to sustainability? **Clean Technologies and Environmental Policy**, [S. l.], v. 17, n. 6, p. 1393–1400, 2015. DOI: 10.1007/s10098-014-0886-5.

SILVA, Bruno Rezende. **Telhados Verdes em Clima Tropical uma Nova Técnica e seu Potencial de Atenuação Térmica**. 2016. D.Sc. Thesis - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2016. Disponível em:

<http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/doutorado/2016-1/2746-bruno-rezende-silva>.

SILVEIRA, André Luiz Lopes Da. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 10, n. 1, 2005.

SPI - Social Progress Imperative. [s.d.]. Disponível em: <https://www.socialprogress.org/>. Acesso em: 15 mar. 2024.

STOUT, Daniel Trevor; WALSH, Thomas C.; BURIAN, Steven J. Ecosystem services from rainwater harvesting in India. **Urban Water Journal**, [S. l.], v. 14, n. 6, p. 561–573, 2017. DOI: 10.1080/1573062X.2015.1049280.

STRINGFELLOW, William T.; JAIN, Ravi. Engineering the global ecosystem. **Clean Technologies and Environmental Policy**, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 197–203, 2010. DOI: 10.1007/s10098-010-0302-8.

TECNOTRI INDÚSTRIA DE PLÁSTICOS S.A. **Cisterna Vertical Modular 1000 Litros. Reúso de Água**. [s.d.]. Disponível em: <https://cisternas.tecnotri.com.br/produto/cisterna-vertical-modular-1000-litros-kit-reuso-de-agua/>. Acesso em: 25 maio. 2024.

TOTUGUI, Natália; VALVERDE, Bruna; SANT'ANA, D. Previsão de demanda urbana de água: uma análise do consumo de água em estabelecimentos comerciais no Distrito Federal. *Em: XVII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2018, Fox do Iguaçu. Anais [...]. Fox do Iguaçu p. 3549–3557.*

TRENBERTH, KE. Changes in precipitation with climate change. **Climate Research**, [S. l.], v. 47, n. 1, p. 123–138, 2011. DOI: 10.3354/cr00953. Disponível em: <http://www.int-res.com/abstracts/cr/v47/n1-2/p123-138/>.

TRIMAILLE, Etienne. **QuickOSM**. [s.d.]. Disponível em: <https://github.com/3liz/QuickOSM/>. Acesso em: 13 abr. 2024.

TROY, Austin; ROMM, Jeff. Assessing the price effects of flood hazard disclosure under the California natural hazard disclosure law (AB 1195). **Journal of Environmental Planning and Management**, [S. l.], v. 47, n. 1, p. 137–162,

2004. DOI: 10.1080/0964056042000189844. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0964056042000189844>.

TURNER, R. Kerry; MORSE-JONES, Sian; FISHER, Brendan. Ecosystem valuation. **Annals of the New York Academy of Sciences**, [S. l.], v. 1185, n. 1, p. 79–101, 2010. DOI: 10.1111/j.1749-6632.2009.05280.x. Disponível em: <https://nyaspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1749-6632.2009.05280.x>.

UNITED NATIONS. **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision United Nations**. New York. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>.

USGBC, U. S. Green Building Council, Inc. **LEED Reference Guide for Neighborhood Development**. Washington, DC. v. 4

VERÓL, Aline Pires. Requalificação Fluvial Integrada ao Manejo de Águas Urbanas para Cidades Mais Resilientes. [S. l.], p. 345, 2013.

VÉROL, Aline Pires; VAZQUEZ, Elaine Garrido; MIGUEZ, Marcelo Gomes. **Sistemas prediais hidráulicos e sanitários: projetos práticos e sustentáveis**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019. v. 1

VINCENT, Santiago; RADHAKRISHNAN, Mohanasundar; HAYDE, Laszlo; PATHIRANA, Assela. Enhancing the Economic Value of Large Investments in Sustainable Drainage Systems (SuDS) through Inclusion of Ecosystems Services Benefits. **Water**, [S. l.], v. 9, n. 11, p. 841, 2017. DOI: 10.3390/w9110841. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2073-4441/9/11/841>.

VUJIČIĆ, Dragan; VASILJEVIĆ, Nevena; RADIĆ, Boris; TUTUNDŽIĆ, Andreja; GALEČIĆ, Nevenka; SKOČAJIĆ, Dejan; OCOKOLJIĆ, Mirjana. Conceptualisation of the Regulatory Framework of Green Infrastructure for Urban Development: Identifying Barriers and Drivers. **Land**, [S. l.], v. 13, n. 5, p. 692, 2024. DOI: 10.3390/land13050692. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/13/5/692>.

WEI, Fang; ZHAO, Lvwang. The Effect of Flood Risk on Residential Land Prices. **Land**, [S. l.], v. 11, n. 10, p. 1612, 2022. DOI: 10.3390/land11101612.

WILKINSON, Sara; FEITOSA, Renato Castiglia. Technical and Engineering Issues in Green Roof Retrofit. *Em: Green Roof Retrofit*. [s.l.] : Wiley, 2016. p. 14–36. DOI: 10.1002/9781119055587.ch2.

YANG, Rui; WONG, Christina W. Y.; MIAO, Xin. Evaluation of the coordinated development of economic, urbanization and environmental systems: a case study of China. **Clean Technologies and Environmental Policy**, [S. l.], n. 0123456789, 2021. DOI: 10.1007/s10098-020-01999-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01999-5>.

YAZDANFAR, Zeinab; SHARMA, Ashok. Urban drainage system planning and design – challenges with climate change and urbanization: a review. **Water Science and Technology**, [S. l.], v. 72, n. 2, p. 165–179, 2015. DOI: 10.2166/wst.2015.207. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article/72/2/165/14899/Urban-drainage-system-planning-and-design>.

ZHANG, Lei. Flood hazards impact on neighborhood house prices: A spatial quantile regression analysis. **Regional Science and Urban Economics**, [S. l.], v. 60, p. 12–19, 2016. DOI: 10.1016/j.regsciurbeco.2016.06.005.

ZHANG, Lei; LEONARD, Tammy. Flood Hazards Impact on Neighborhood House Prices. **The Journal of Real Estate Finance and Economics**, [S. l.], v. 58, n. 4, p. 656–674, 2019. DOI: 10.1007/s11146-018-9664-1.

ZHANG, Shouhong; LIN, Zixuan; ZHANG, Sunxun; GE, De. Stormwater retention and detention performance of green roofs with different substrates: Observational data and hydrological simulations. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 291, p. 112682, 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112682. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479721007441>.

ZHENG, Xaio Yun. Ancient Urban Water System Construction of China. *Em: Encyclopaedia of the History of Science, Technology, and Medicine in Non-Western Cultures*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. p. 1–6. DOI: 10.1007/978-94-007-3934-5_10221-1.

ZHOU, Qianqian; LENG, Guoyong; SU, Jiongheng; REN, Yi. Comparison of urbanization and climate change impacts on urban flood volumes: Importance of urban planning and drainage adaptation. **Science of The Total Environment**,

[S. I.], v. 658, p. 24–33, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.184. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969718350290>.

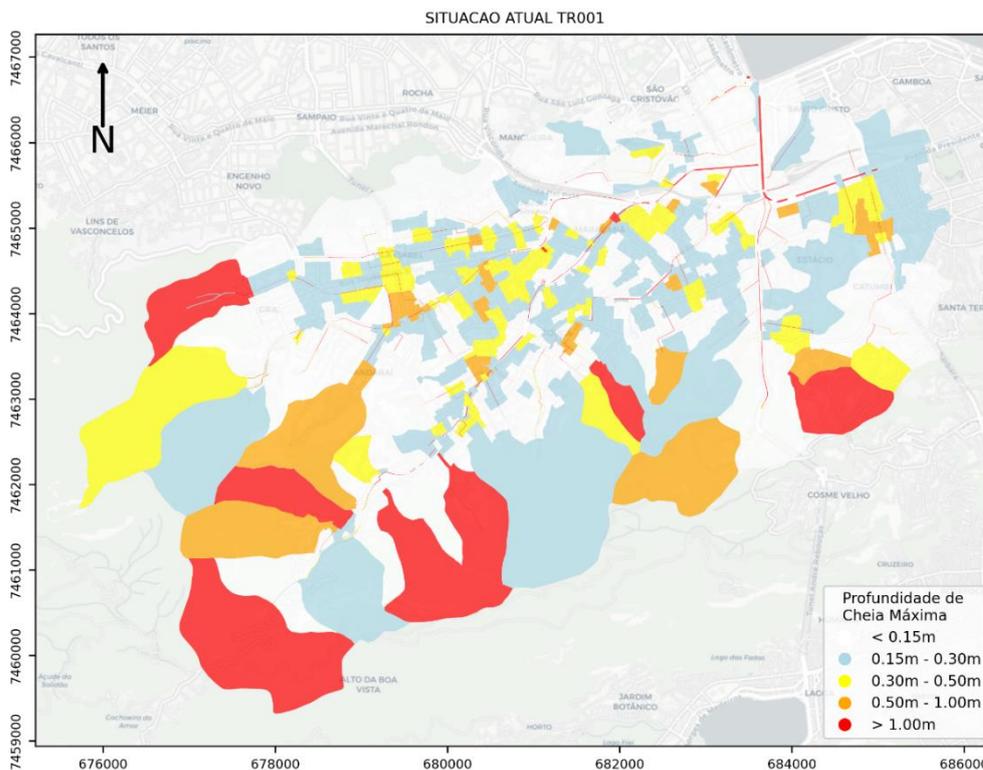
ZINCO. **ZinCo - Life on Roofs**. [s.d.]. Disponível em: <https://zinco-greenroof.com/>. Acesso em: 12 jun. 2024.

8. APÊNDICE

8.1. MAPAS DE INUNDAÇÃO

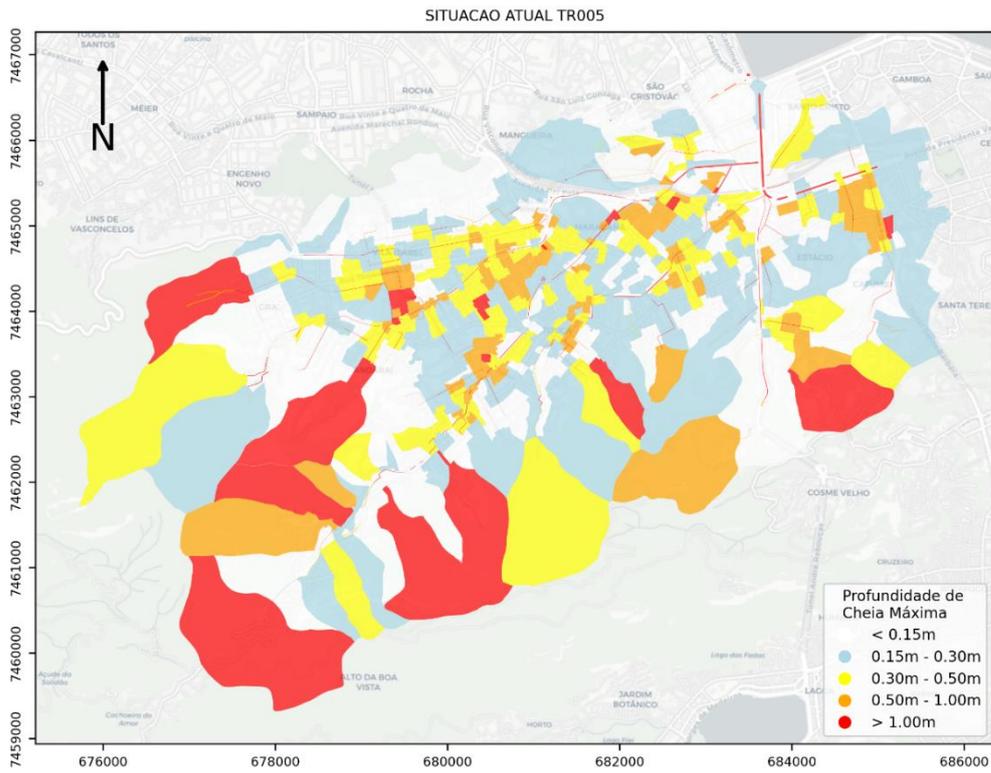
Mapas de inundações para demais tempos de recorrência encontram-se a seguir.

Figure 8.1 - Mapa de mancha de inundação da Situação Atual para o evento de tempo de recorrência de 1 ano.



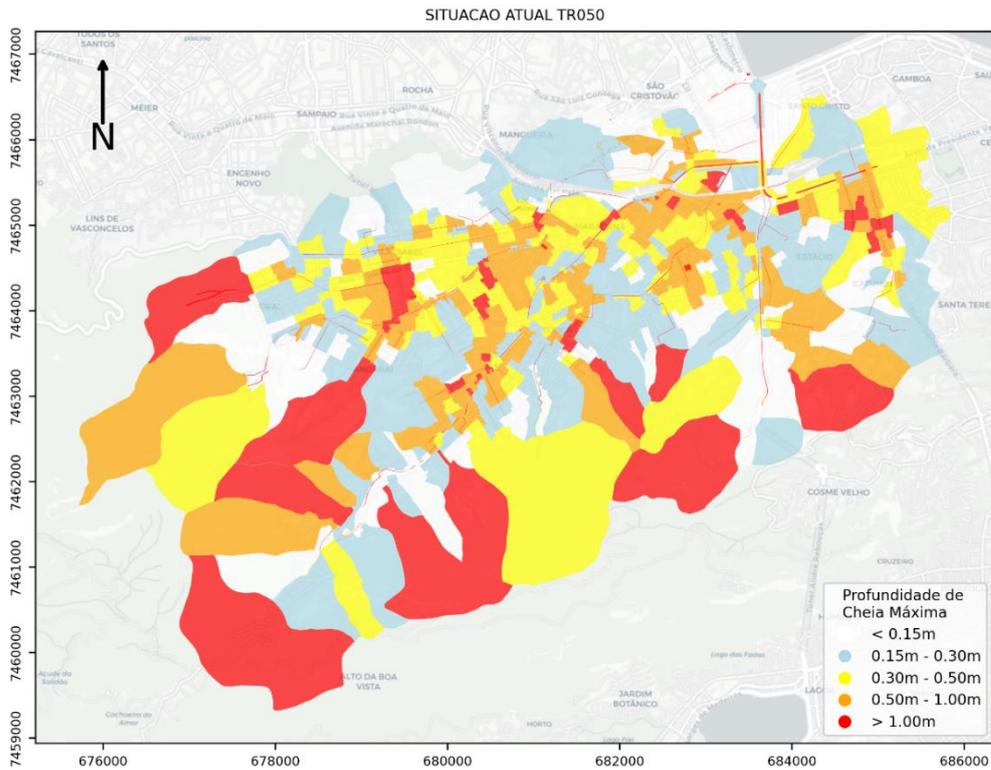
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.2 - Mapa de mancha de inundação da Situação Atual para o evento de tempo de recorrência de 5 anos.



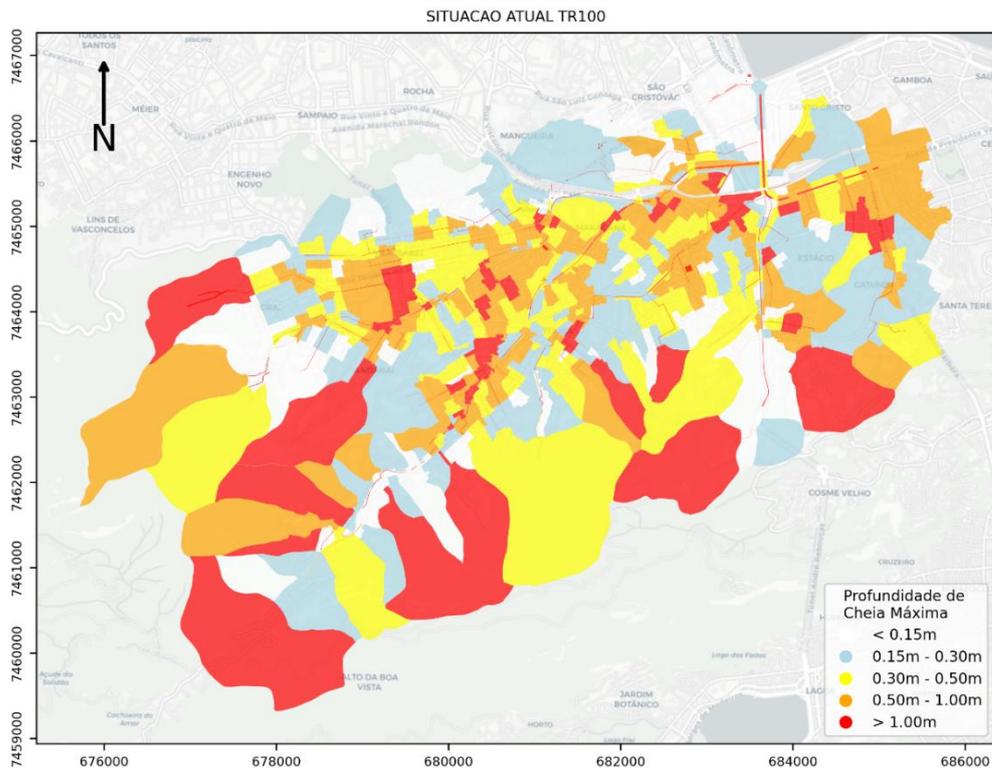
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.3 - Mapa de mancha de inundação da Situação Atual para o evento de tempo de recorrência de 50 anos.



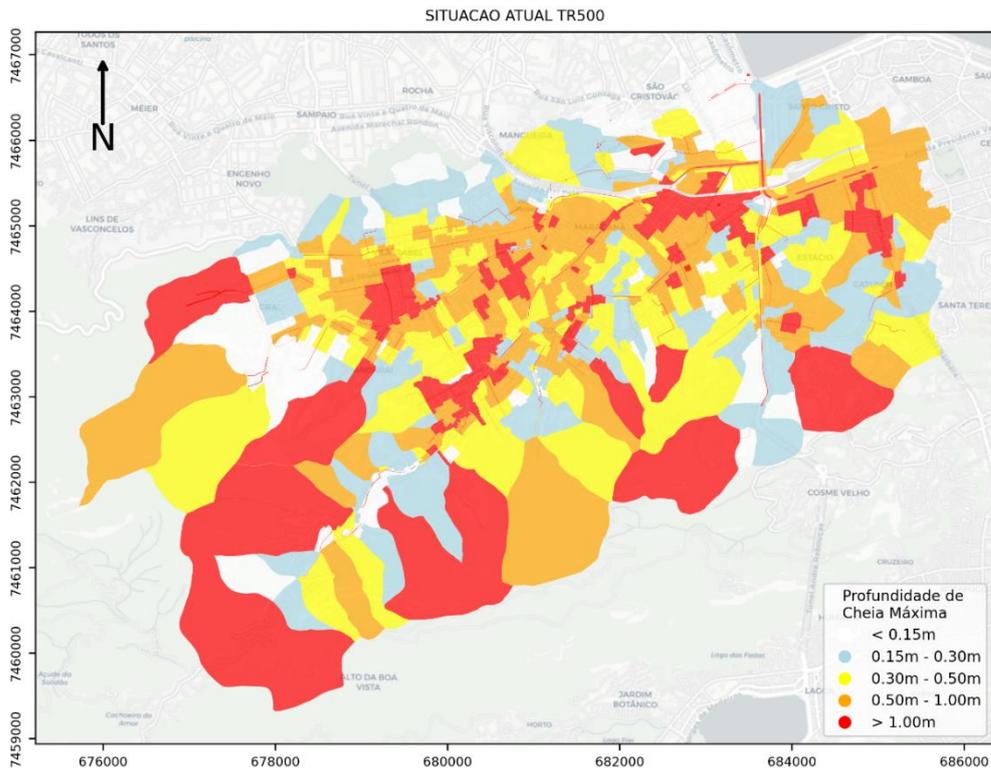
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.4 - Mapa de mancha de inundação da Situação Atual para o evento de tempo de recorrência de 100 anos.



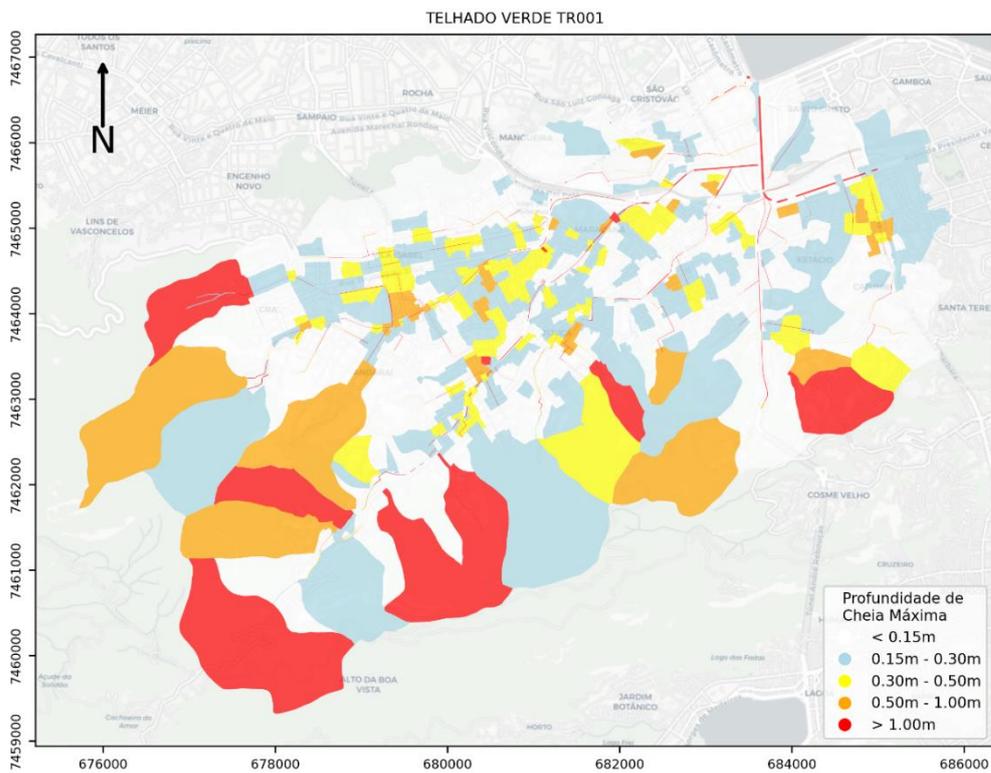
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.5 - Mapa de mancha de inundação da Situação Atual para o evento de tempo de recorrência de 500 anos.



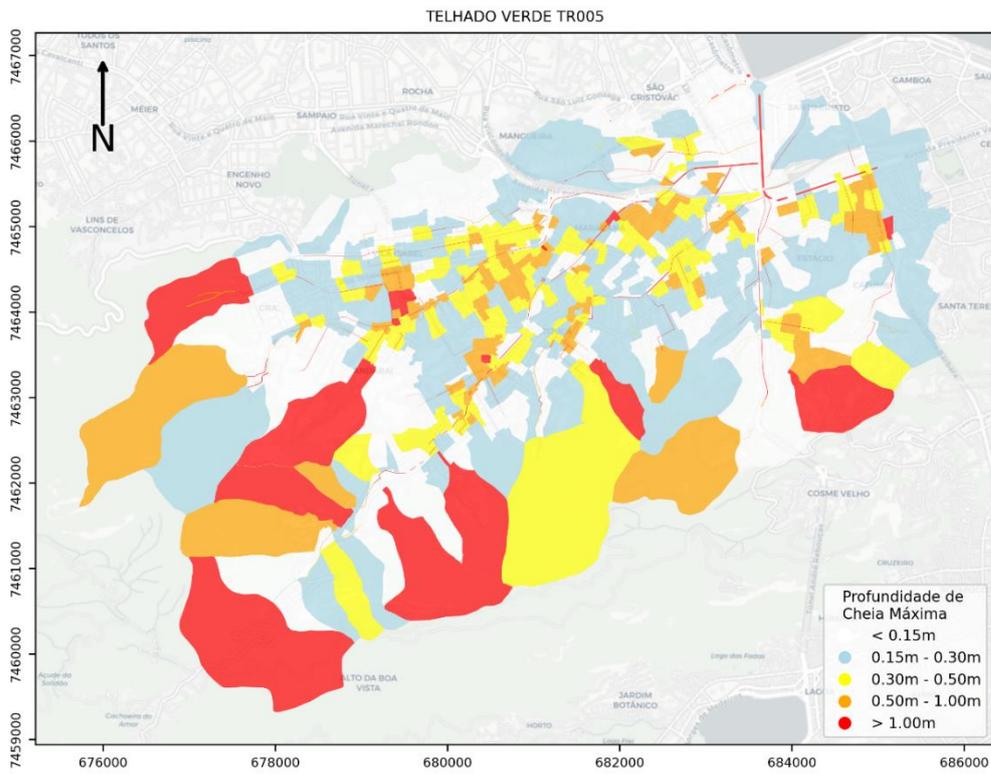
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.6 - Mapa de mancha de inundação do cenário Telhado Verde para o evento de tempo de recorrência de 1 ano.



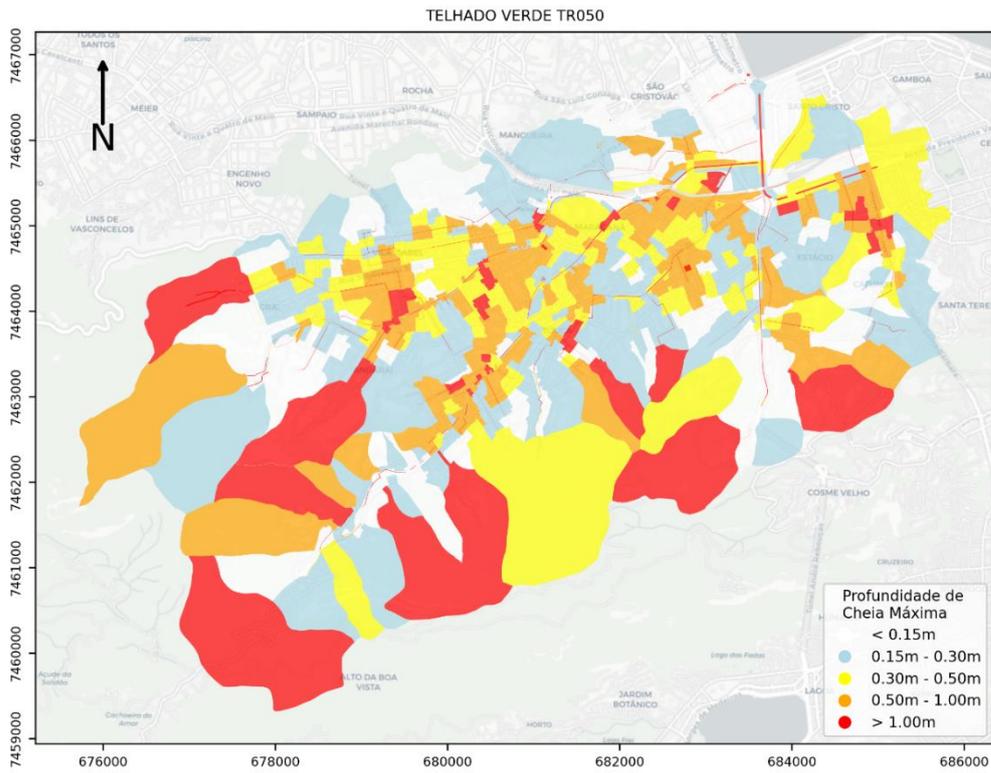
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.7 - Mapa de mancha de inundação do cenário Telhado Verde para o evento de tempo de recorrência de 5 anos.



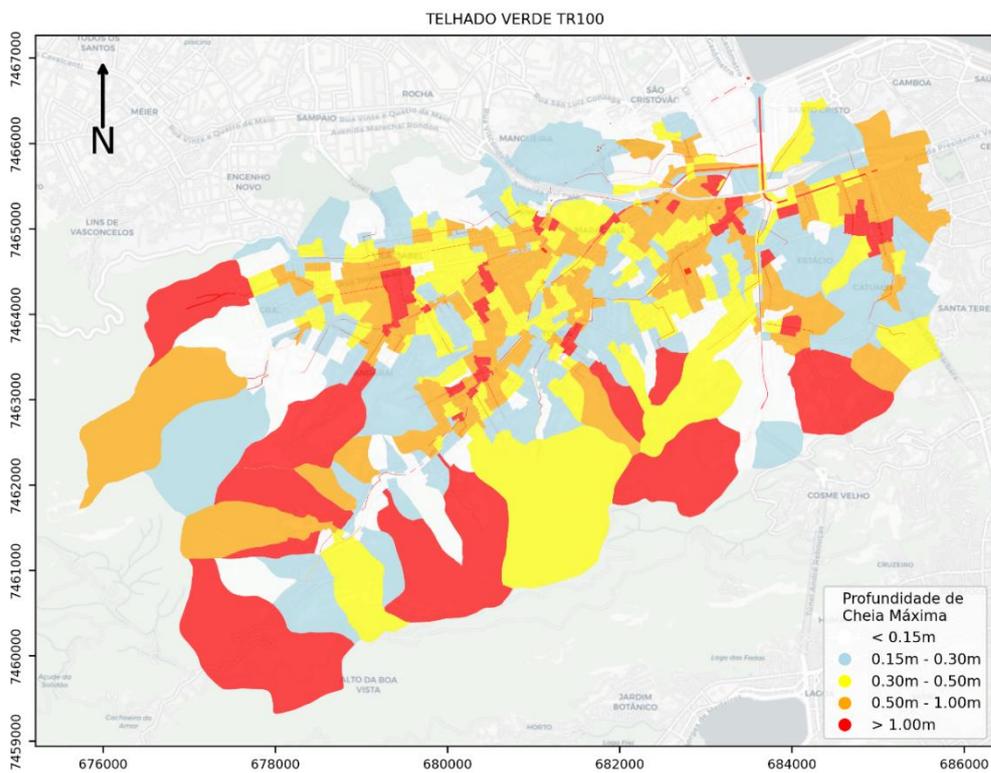
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.8 - Mapa de mancha de inundação do cenário Telhado Verde para o evento de tempo de recorrência de 50 anos.



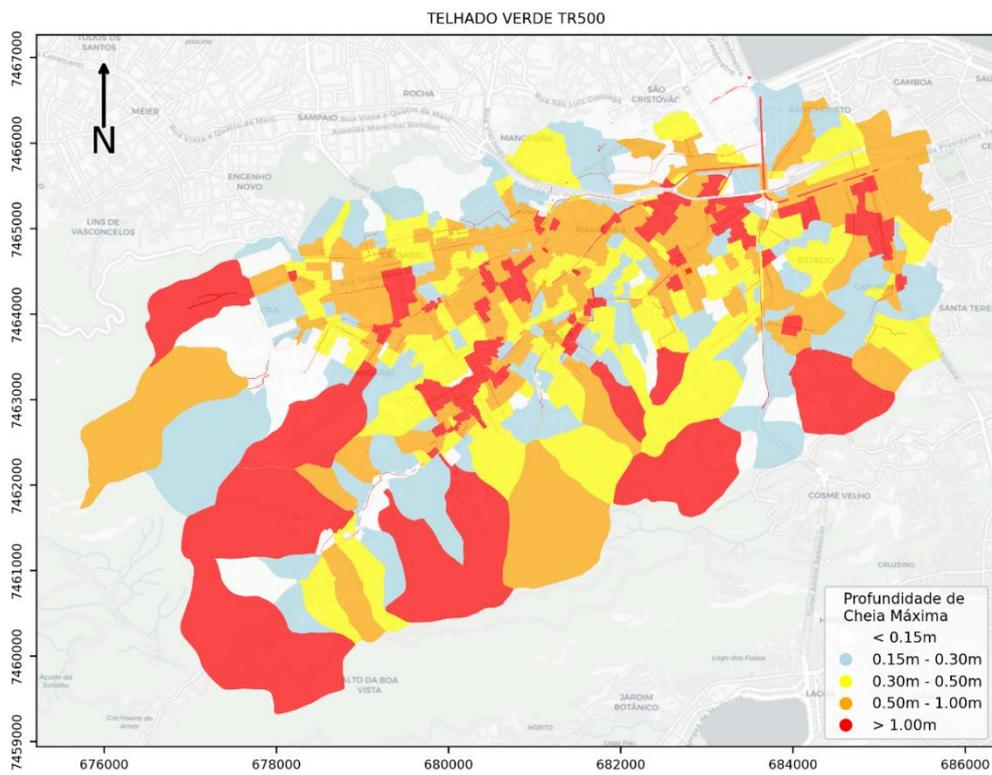
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.9 - Mapa de mancha de inundação do cenário Telhado Verde para o evento de tempo de recorrência de 100 anos.



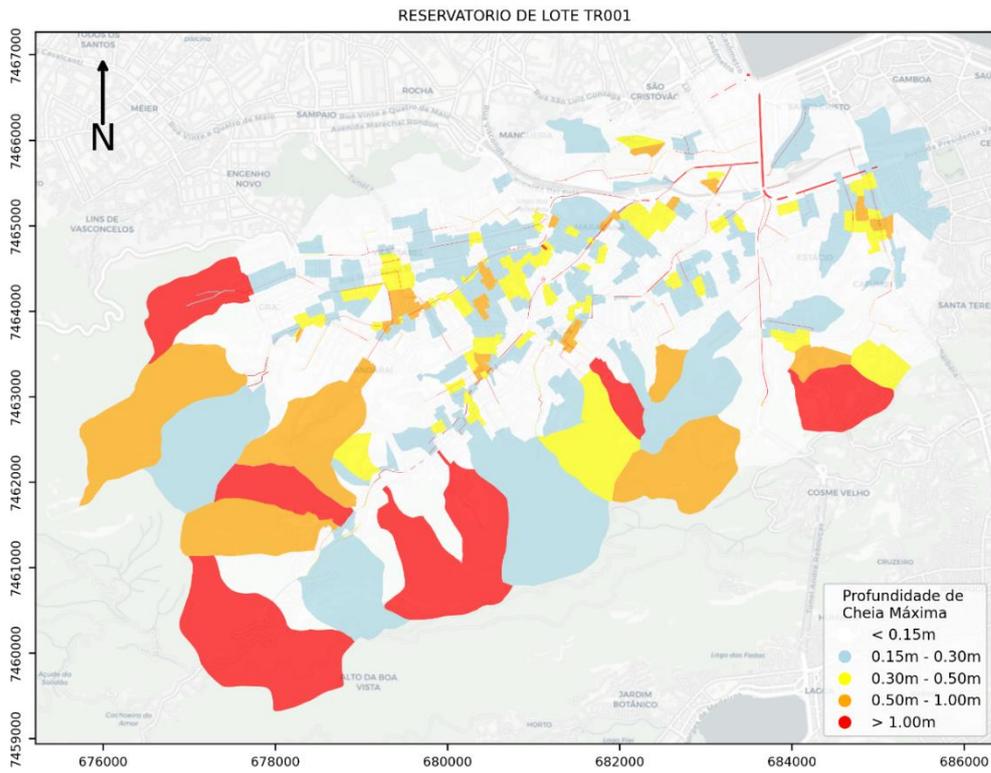
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.10 - Mapa de mancha de inundação do cenário Telhado Verde para o evento de tempo de recorrência de 500 anos.



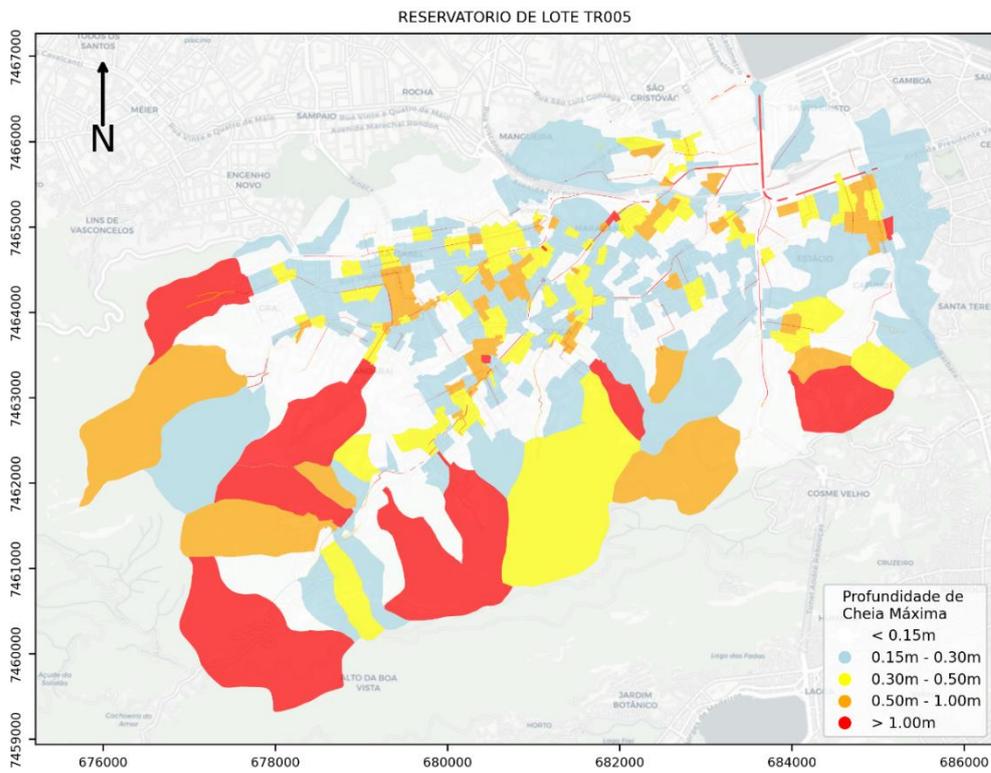
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.11 - Mapa de mancha de inundação do cenário Reservatório de Lote para o evento de tempo de recorrência de 1 ano.



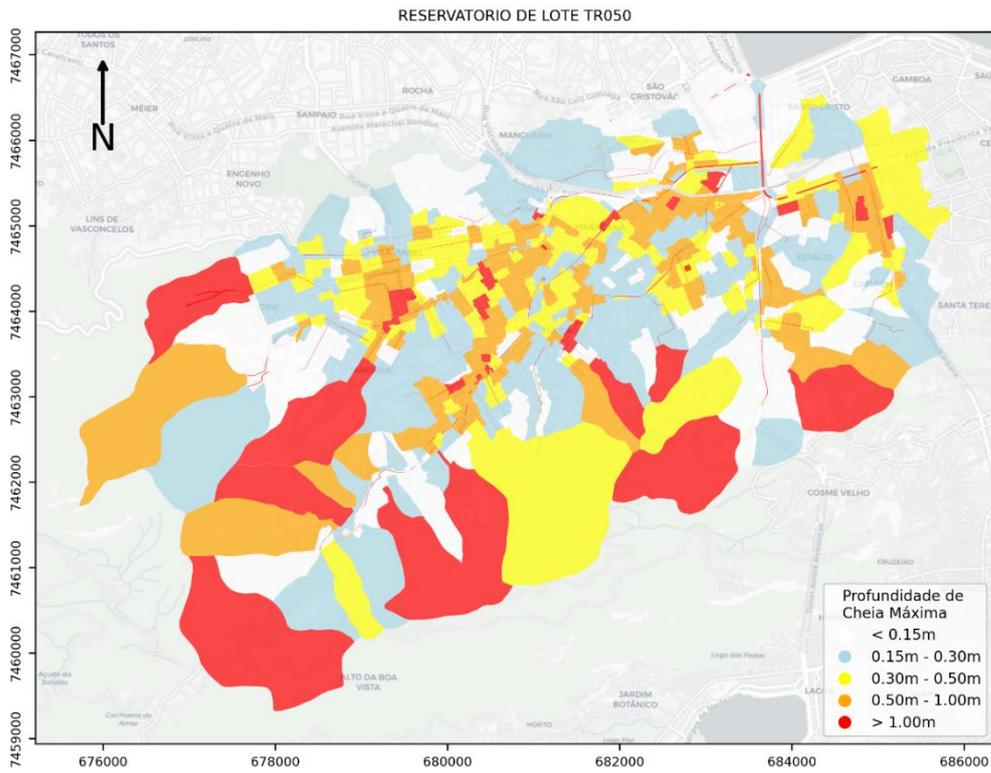
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.12 - Mapa de mancha de inundação do cenário Reservatório de Lote para o evento de tempo de recorrência de 5 anos.



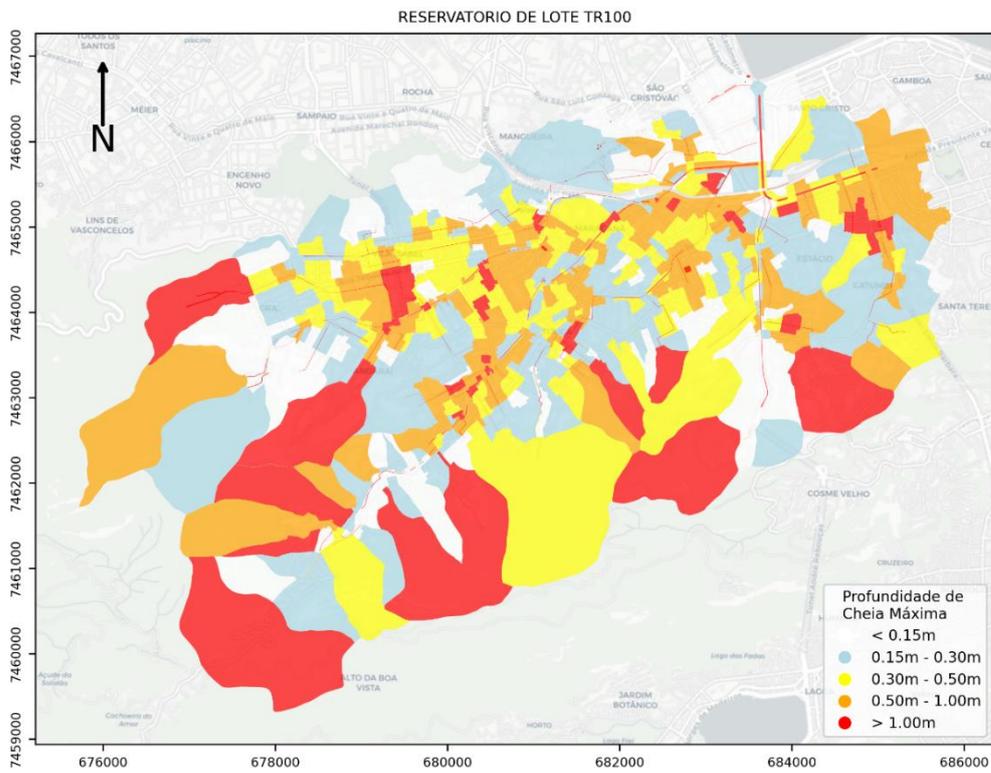
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.13 - Mapa de mancha de inundação do cenário Reservatório de Lote para o evento de tempo de recorrência de 50 anos.



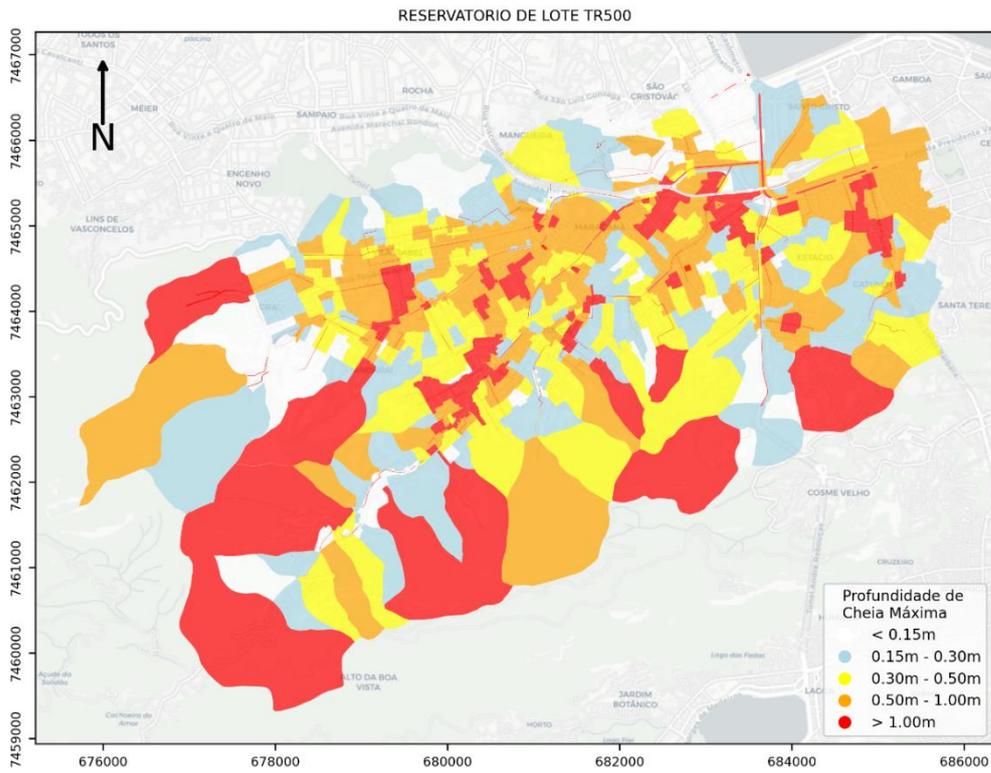
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.14 - Mapa de mancha de inundação do cenário Reservatório de Lote para o evento de tempo de recorrência de 100 anos.



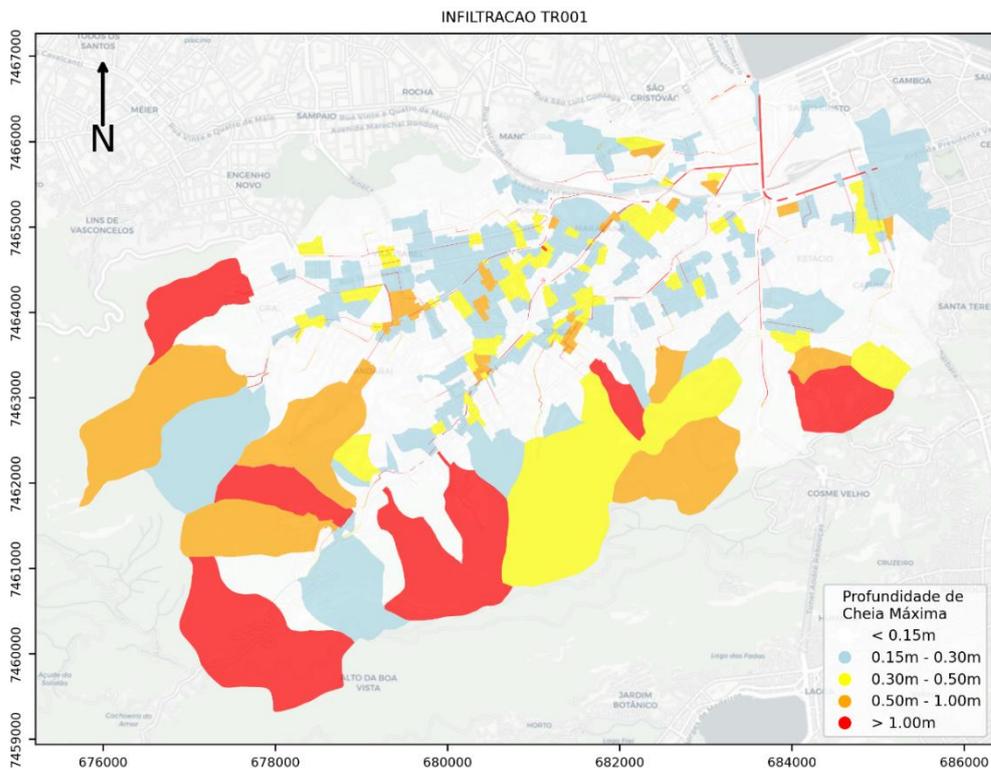
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.15 - Mapa de mancha de inundação do cenário Reservatório de Lote para o evento de tempo de recorrência de 500 anos.



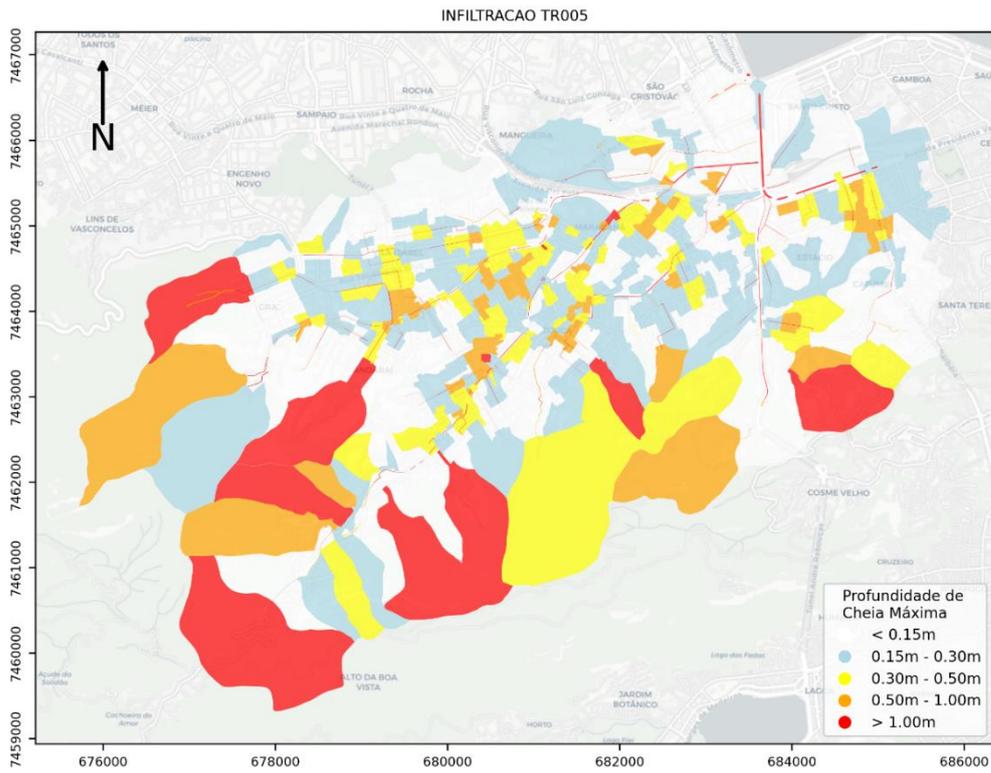
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.16 - Mapa de mancha de inundação do cenário Infiltração para o evento de tempo de recorrência de 1 ano.



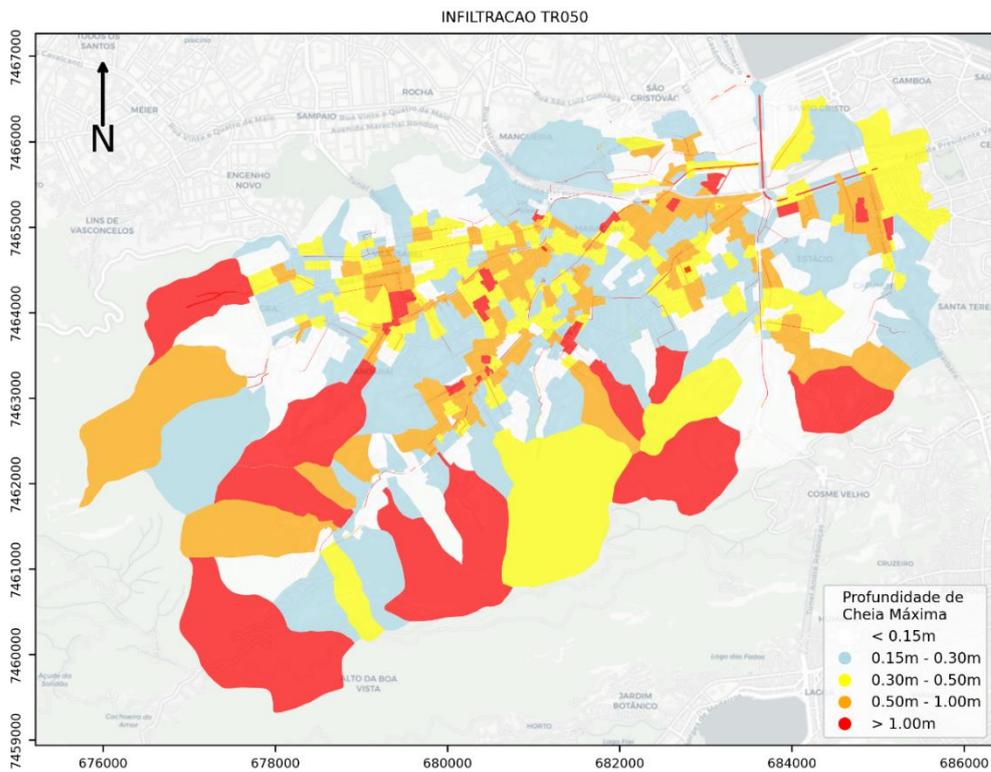
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.17 - Mapa de mancha de inundação do cenário Infiltração para o evento de tempo de recorrência de 5 anos.



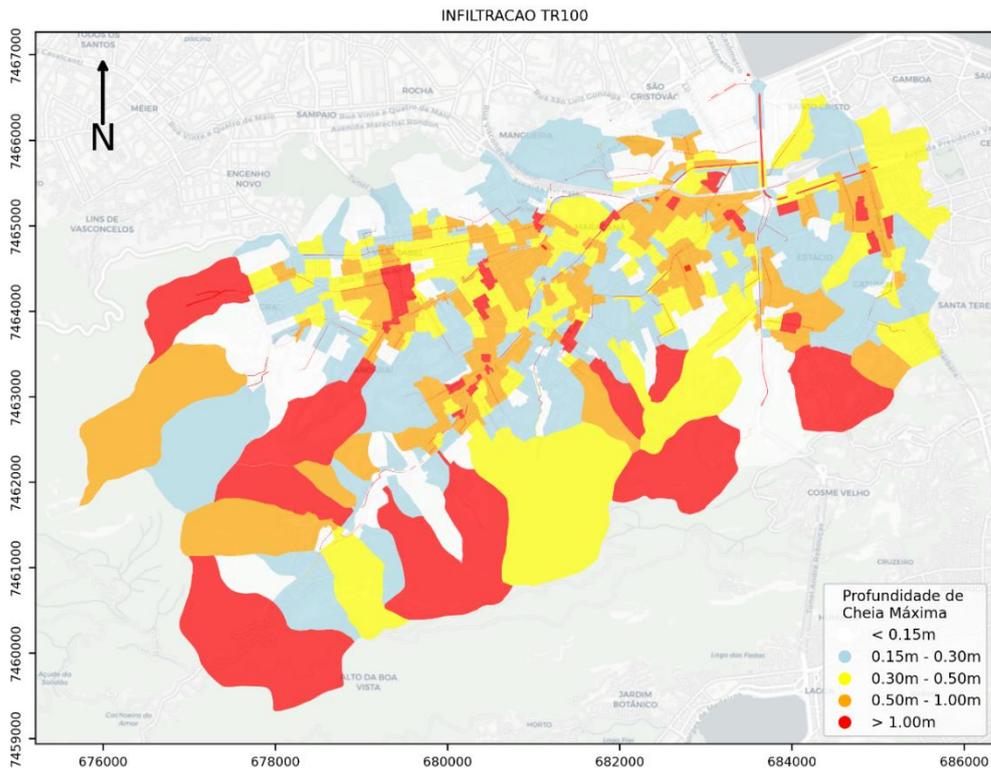
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.18 - Mapa de mancha de inundação do cenário Infiltração para o evento de tempo de recorrência de 50 anos.



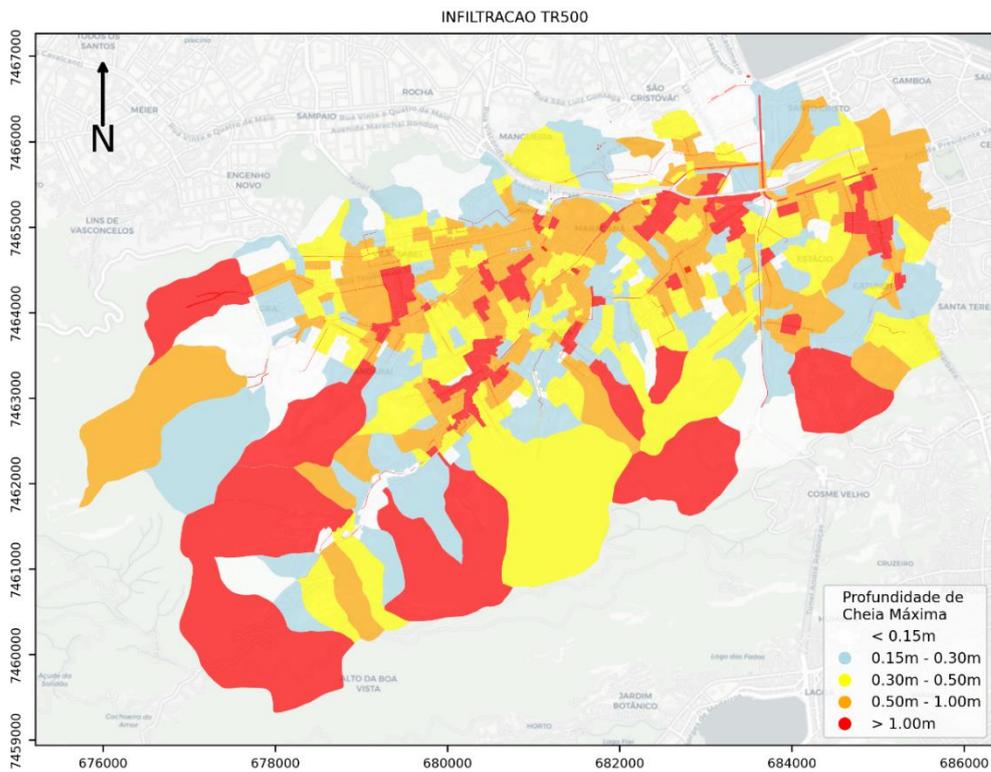
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.19 - Mapa de mancha de inundação do cenário Infiltração para o evento de tempo de recorrência de 100 anos.



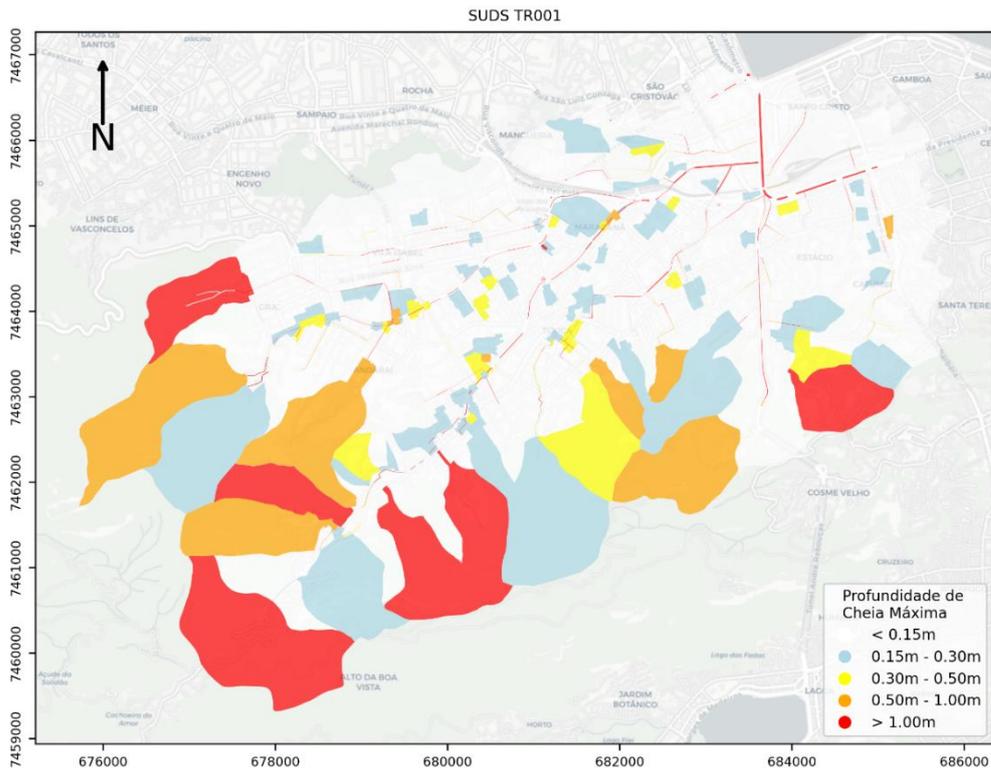
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.20 - Mapa de mancha de inundação do cenário Infiltração para o evento de tempo de recorrência de 500 anos.



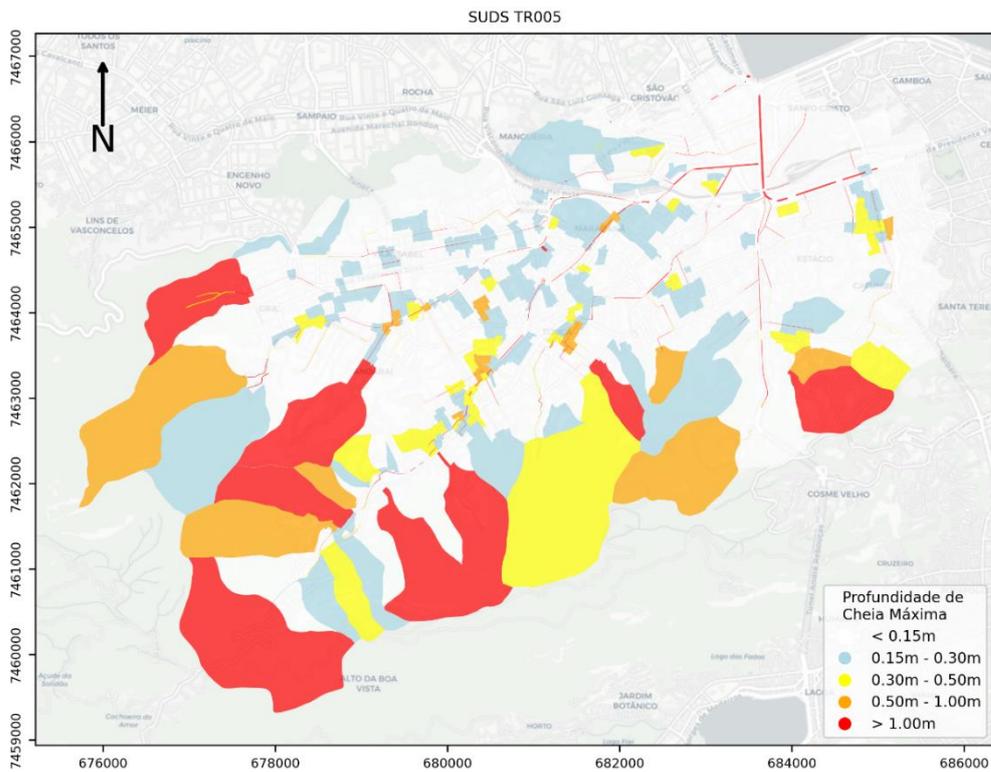
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.21 - Mapa de mancha de inundação do cenário de SDUS para o evento de tempo de recorrência de 1 ano.



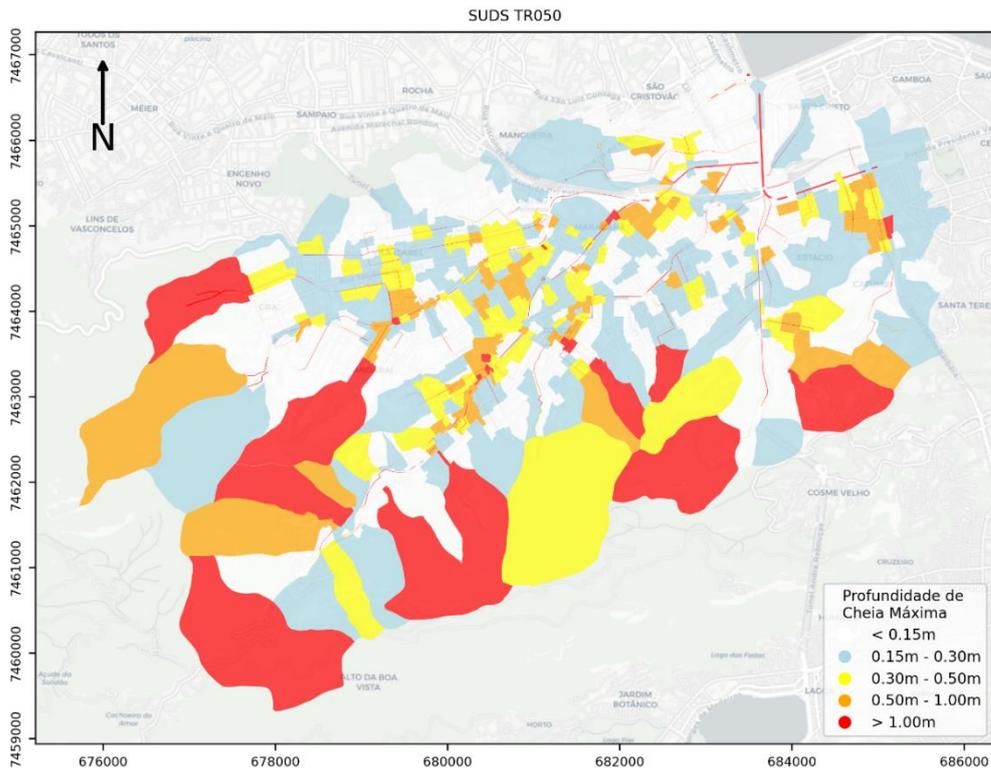
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.22 - Mapa de mancha de inundação do cenário de SDUS para o evento de tempo de recorrência de 5 anos.



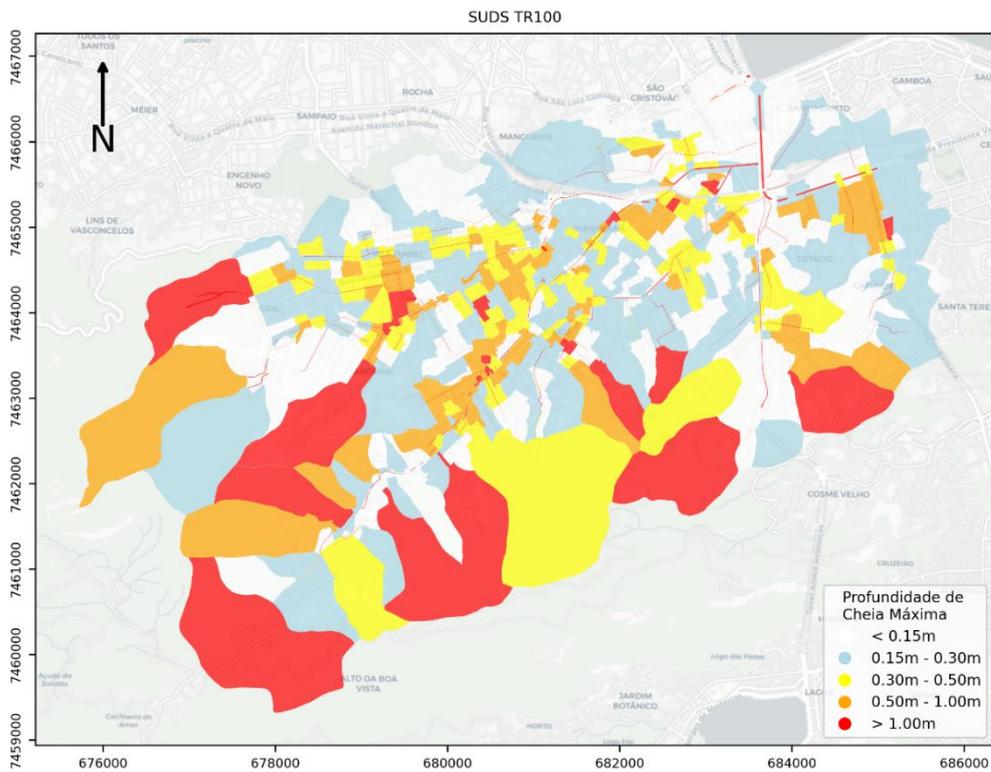
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.23 - Mapa de mancha de inundação do cenário de SDUS para o evento de tempo de recorrência de 50 anos.



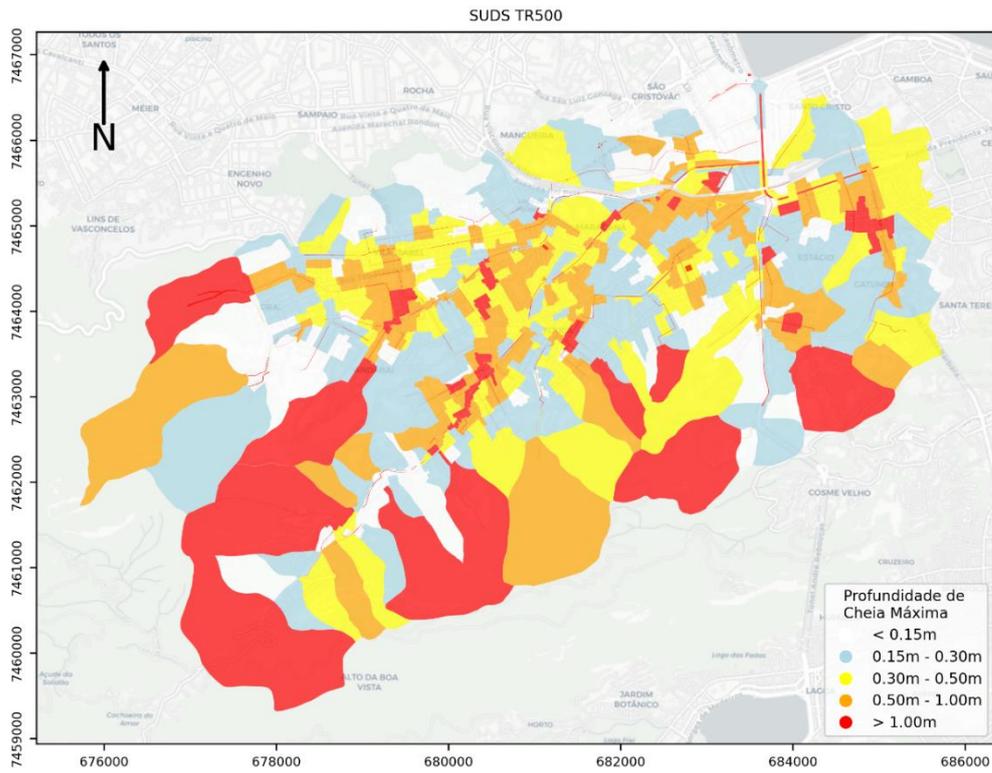
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.24 - Mapa de mancha de inundação do cenário de SDUS para o evento de tempo de recorrência de 100 anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figure 8.25 - Mapa de mancha de inundação do cenário de SDUS para o evento de tempo de recorrência de 500 anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

8.2. TABELAS ORÇAMENTÁRIAS

As tabelas de custo de instalação de jardins de chuva e pavimento permeável estão localizadas a seguir.

Quadro 8.1 - Custo de instalação de jardim de chuva por metro quadrado (IO: 04/2024).

	COD. SCO	SERVIÇO	UN.	CUSTO UN.	QNT.	CUSTO TOTAL
1	PREPARO DO TERRENO					1,8%
1.1	SE 20.05.0200	Preparo manual de terreno, compreendendo acerto, raspagem eventualmente até 0,25m de profundidade e afastamento lateral do material excedente.	m²	R\$ 11,51	1	R\$ 11,51
2	ESCAVAÇÃO, ASSENTAMENTO E PLANTIO					65,0%
2.1	MT 05.30.0100	Escavação manual em material de 1ª categoria, a céu aberto, para profundidades maiores que 0,50m, com remoção até 10m (1dam).	m³	R\$ 53,70	0,75	R\$ 40,28
2.2	PJ 20.05.0200	Aterro com terra preta simples, para execução de gramados. Camada de 20 cm.	m³	R\$ 350,16	0,20	R\$ 70,03
2.3	DR 55.05.0056	Camada vertical drenante feita com areia, inclusive fornecimento do material. Camada de 40 cm.	m³	R\$ 151,79	0,40	R\$ 60,72
2.4	DR 65.05.0100	Manta Bidim ou similar tipo OP-30 em drenos subterrâneos, gabiões, filtros de transição, drenos profundos ou valetas. Fornecimento e colocação.	m²	R\$ 7,23	0,60	R\$ 4,34
2.5	PJ 05.10.0056	Plantio de cobertura vegetal, considerando 12 mudas por m².	m²	R\$ 6,36	1	R\$ 6,36
2.6	PJ 05.05.0610	Espécies vegetais com altura de (0,10 a 0,40)m, tipo <i>Jasminum Nitidum</i> (Jasmim Estrela), <i>Barleria Cristata</i> (Caetizinho), <i>Canna Denudata</i> (Cana da Índia), <i>Canna x Generalis</i> (Cana-Índica, Biri), <i>Curculigo Capitulata</i> (Curculigo), <i>Dichorisandra Thyrsiflora</i> (Gengibre Azul), <i>Ixora SP</i> (Ixora Ana), <i>Kalanchoe Gastonis-Bonnieri</i> (Planta da Vida), <i>Maranta Arundinacea</i> (Araruta), <i>Tradescantia Spathacea</i> (Rhoeo), <i>Zantedeschia Aethiopica</i> (Copo de Leite) ou similar e considerando 12 mudas por m². Fornecimento.	m²	R\$ 192,00	1	R\$ 192,00
2.7	PJ 05.10.0109	Plantio de grama, tipo <i>Stenotaphrum Secundatum</i> Variação <i>Variegatum</i> , inclusive transporte e fornecimento.	m²	R\$ 35,53	1	R\$ 35,53
3	CERCAMENTO E MEIO-FIO PARA LÂMINA LIVRE					8,1%
3.1	BP 20.20.0050(A)	Meio-fio de concreto pré-moldado (fck=15MPa), medindo 0,15m na base e com altura de 0,30m, rejuntamento com argamassa de cimento e areia no traço 1:4, inclusive o fornecimento de todos os materiais, escavação e reaterro.	m	R\$ 51,20	1	R\$ 51,20
3.2	PJ 15.05.0040(A)	Cerca protetora de jardim, formando arcos com 46cm de diâmetro em aço redondo liso de 1/2", superpostos de 10cm, soldados em barra de (1 1/2"x3/8"), com montantes do mesmo material, distanciados de 75cm, chumbados em blocos de concreto, inclusive escavação, reaterro, carga, descarga e transporte. Fornecimento e colocação.	m	R\$ 130,21	1	R\$ 130,21
4	CARGA E TRANSPORTE DE MATERIAL 3,3%					
4.1	Carga mecanizada de terra em caminhão basculante - unidade: m³		m³	R\$ 1,97	0,75	R\$ 1,48
4.1.1	SC 10.05.1450	Servente (inclusive encargos sociais).	h	R\$ 19,18	0,0196	
4.1.2	EQ 05.05.0056(A)	Caminhão basculante, capacidade de 5m³, com motorista, com as seguintes especificações mínimas: motor diesel de 162CV. Custo horário improdutivo (motor desligado).	h	R\$ 32,34	0,0098	
4.1.3	EQ 15.05.0380	Minicarregadeira, com operador, material de operação e material de manutenção, e as seguintes especificações mínimas: motor diesel de 50CV, peso de operação de 2,5t, capacidade de operação de 680Kg, força de desagregação de 1.400Kgf, altura de descarga de 2,3m. Custo horário produtivo.	h	R\$ 130,81	0,0098	
4.2	Transporte e descarga de terra em caminhão basculante. Material excedente e terra preta simples. Até 10 Km de distância. - unidade: m³		m³	R\$ 20,20	0,95	R\$ 19,19
4.2.1	EQ 05.05.0050(C)	Caminhão basculante, capacidade de 5m³, com motorista, material de operação e material de manutenção, com as seguintes especificações mínimas: motor diesel de 162CV. Custo horário produtivo.	h	R\$ 152,03	0,1329	
4	SERVIÇOS FINAIS					1,0%
4.1	SC 30.15.0300	Limpeza de pisos cerâmicos, pisos de pedras ou similares.	m²	R\$ 6,30	1	R\$ 6,30
CUSTO TOTAL POR METRO QUADRADO DE JARDIM DE CHUVA. CAMADA DE 60 cm E 15 cm DE LÂMINA LIVRE.						R\$ 629,15

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 8.2 - Custo de instalação de pavimento permeável por metro quadrado (IO: 04/2024).

COD. SCO		SERVIÇO	UN.	CUSTO UN.	QNT.	CUSTO TOTAL
1	PREPARO DO TERRENO	13,2%				
1.1	SC 05.10.0200	Demolição, com equipamento de ar comprimido, de pavimentação de concreto simples, com 15cm de espessura, inclusive afastamento lateral dentro do canteiro de serviços.	m²	R\$ 27,21	1	R\$ 27,21
1.2	SE 20.05.0200	Raspagem do terreno. Preparo manual de terreno, compreendendo acerto, raspagem eventualmente até 0,25m de profundidade e afastamento lateral do material excedente.	m²	R\$ 11,51	1	R\$ 11,51
2	ESCAVAÇÃO, ASSENTAMENTO E PAVIMENTAÇÃO	80,0%				
2.1	MT 05.30.0050	Escavação manual em material de 1a categoria, a céu aberto, até 0,50m de profundidade com remoção até 1 dam.	m³	R\$ 46,03	0,3	R\$ 13,81
2.2	DR 65.05.0050	Colchão drenante com camada de 30cm de pedra britada no 3 e filtro de transição de manta Bidim, tipo OP-30 ou similar.	m²	R\$ 61,87	1	R\$ 61,87
2.3	BP 10.20.0150	Pavimentação com blocos vazados de concreto, medindo: (50x50x10)cm, assentes em camadas de areia grossa de 2cm, exclusive preparo do terreno, Concregrama CGD, Neo-Rex ou similar. Fornecimento e assentamento.	m²	R\$ 158,88	1	R\$ 158,88
3	CARGA E TRANSPORTE DE MATERIAL	2,3%				
3.1		Carga mecanizada do material escavado em caminhão basculante - unidade: m³	m³	R\$ 1,97	0,3	R\$ 0,59
3.1.1	SC 10.05.1450	Servente (inclusive encargos sociais).	h	R\$ 19,18	0,0196	
3.1.2	EQ 05.05.0056(A)	Caminhão basculante, capacidade de 5m³, com motorista, com as seguintes especificações mínimas: motor diesel de 162CV. Custo horário improdutivo (motor desligado).	h	R\$ 32,34	0,0098	
3.1.3	EQ 15.05.0380	Minicarregadeira, com operador, material de operação e material de manutenção, e as seguintes especificações mínimas: motor diesel de 50CV, peso de operação de 2,5t, capacidade de operação de 680Kg, força de desagregação de 1.400Kgf, altura de descarga de 2,3m. Custo horário produtivo.	h	R\$ 130,81	0,0098	
3.2		Transporte e descarga de terra em caminhão basculante. Até 10 Km de distância. - unidade: m³	m³	R\$ 0,20	0,3	R\$ 6,06
3.2.1	EQ 05.05.0050 (C)	Caminhão basculante, capacidade de 5m³, com motorista, material de operação e material de manutenção, com as seguintes especificações mínimas: motor diesel de 162CV. Custo horário produtivo.	h	R\$ 152,03	0,1329	
4	SERVIÇOS FINAIS	4,6%				
4.1		Limpeza geral da superfície - unidade: m²	m²	R\$ 13,43	1	R\$ 13,43
4.1.1	SC 10.05.1450	Servente (inclusive encargos sociais).	h	R\$ 19,18	0,7	
CUSTO TOTAL POR METRO QUADRADO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL. CAMADA DE 30 cm.						R\$ 293,36

Fonte: Elaborado pelo autor.