



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica
Programa de Engenharia Urbana

CAROLINA LOPES CARVALHO

ANÁLISE DA AMEAÇA DE INUNDAÇÕES FRENTE A CENÁRIOS FUTUROS
ADVERSOS DE EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AUMENTO DA
URBANIZAÇÃO

Rio de Janeiro

2024



UFRJ

CAROLINA LOPES CARVALHO

ANÁLISE DA AMEAÇA DE INUNDAÇÕES FRENTE A CENÁRIOS FUTUROS
ADVERSOS DE EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AUMENTO DA
URBANIZAÇÃO

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

Orientador: Marcelo Gomes Miguez

Coorientador: Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira

Rio de Janeiro

2024

Carvalho, Carolina Lopes.

Análise da ameaça de inundações frente a cenários futuros adversos de efeitos das mudanças climáticas e aumento da urbanização / Carolina Lopes Carvalho – 2024.

143 f. : 48 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

Coorientador: Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira

1. Sistema de drenagem urbana. 2. Mudanças climáticas. 3. Drenagem sustentável. 4. Inundações. I. Miguez, Marcelo Gomes, Oliveira, Antonio Krishnamurti Beleño e Carvalho, Carolina Lopes. II Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. III. Análise da ameaça de inundações frente a cenários futuros adversos de efeitos das mudanças climáticas e aumento da urbanização.



UFRJ

ANÁLISE DA AMEAÇA DE INUNDAÇÕES FRENTE A CENÁRIOS FUTUROS
ADVERSOS DE EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AUMENTO DA
URBANIZAÇÃO

Carolina Lopes Carvalho

Orientador: Marcelo Gomes Miguez

Coorientador: Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira

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

Aprovada pela Banca:

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

Prof. Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira, D.Sc., PUC-Rio

Prof. Andrés Eduardo Torres Abello, PhD., Facultad de Ingeniería/PUJ

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

Prof. Leandro Torres Di Gregório, D.Sc., PEU/POLI/UFRJ

RIO DE JANEIRO

2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, um agradecimento para os meus pais, em especial para o meu pai, que neste mês completa 90 anos. Sei que vocês nunca mediram esforços para proporcionar a melhor educação para mim e para o Zé. Se não fosse por vocês, com certeza não teria chegado até aqui. Agradeço também ao meu irmão, José Guilherme, pelo apoio e por sempre ter sido uma referência de dedicação aos estudos para mim.

Ao meu companheiro, Lucas, por toda a dedicação, amor, incentivo, parceria e compreensão.

Ao meu melhor amigo, Herick, que sempre esteve do meu lado durante todos os momentos, bons e ruins, em todos os setores da minha vida. Agradeço o companheirismo, a paciência e por ter sido o meu suporte sempre que eu precisei. Você é uma das melhores pessoas que eu conheço, e uma das mais importantes da minha vida.

Às minhas amigas de longa data, Amanda e Rayssa, que sempre estiveram do meu lado torcendo por mim. Sei que todas nossas conquistas individuais são celebradas umas pelas outras como se fossem pessoais.

Aos amigos que eu conheci no Programa de Engenharia Urbana, João Paulo, Bruna e Diogo, que compartilharam parte dessa jornada comigo e que eu fico imensamente feliz pela oportunidade de conhecê-los. João, além de colega de turma e amigo, foi um verdadeiro professor para mim durante o mestrado. Obrigada por tudo que você me ensinou. Você é um profissional excelente e por quem eu tenho muita admiração.

E, principalmente, um agradecimento especial aos meus orientadores, Marcelo e Antonio. Foi um privilégio, honra e sorte imensos ter tido vocês como professores e orientadores. Devo a vocês grande parte do conhecimento sobre recursos hídricos que tenho hoje, devido a didática, a capacidade e principalmente a vontade de compartilhar o que sabem. Não só como professores, mas como pessoas. Só tenho a agradecer por todas as vezes que a ansiedade bateu à minha porta e vocês me tranquilizaram; por todas as vezes que eu me distanciei da pesquisa por motivos pessoais, e quanto retornei vocês foram só acolhimento e incentivo. Não consigo colocar em palavras o quanto eu sou grata por ter tido vocês comigo nessa trajetória -talvez se eu escrevesse tão bem quanto o Marcelo conseguiria. Minha admiração pelos dois realmente não cabe aqui.

Por fim, agradeço ao Programa de Engenharia Urbana da Escola Politécnica da UFRJ pela oportunidade de me permitir atuar como pesquisadora ao longo dos últimos anos.

RESUMO

CARVALHO, Carolina Lopes. **Análise da ameaça de inundações frente a cenários futuros adversos de efeitos das mudanças climáticas e aumento da urbanização.** Rio de Janeiro, 2024. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Urbana, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

As mudanças na dinâmica do clima, somadas à urbanização crescente e desordenada, são apontadas como as principais causas do aumento dos cenários de riscos socioambientais aos quais a sociedade está exposta. Os efeitos das mudanças climáticas e as consequências de uma rápida urbanização apontam para a necessidade de cidades mais resilientes. Nessa discussão, porém, nem sempre a relevância do planejamento urbano e de uso do solo são adequadamente valorizados. O objetivo desta pesquisa é comparar relativamente os efeitos de mudanças climáticas e de uma urbanização descontrolada, de forma a avaliar sua importância em um ambiente já densamente ocupado, mas ainda passível de uma urbanização informal em suas encostas vegetadas. Cenários futuros de agravamento de efeitos adversos das mudanças climáticas e da urbanização de uma bacia, para o estudo de caso do bairro Jardim Botânico, localizado na cidade do Rio de Janeiro, são propostos para fins de uma comparação sistemática. Para chegar a este objetivo, a construção de cenários futuros propõe: o aumento da intensidade de chuvas e do nível médio do mar como consequências das mudanças climáticas; a expansão da ocupação informal na parte alta da bacia. Os cenários considerados para a área de estudo foram simulados no modelo matemático hidrodinâmico MODCEL. A hipótese explorada é a de que o impacto causado pela expansão da ocupação informal no aumento da magnitude das inundações é significativo frente às consequências das mudanças climáticas e deve ser igualmente considerado, uma vez que a gestão do território é factível e constitui uma preocupação presente, sobre a qual se pode atuar efetivamente. Os resultados demonstram que as consequências das mudanças climáticas podem ser inferiores à expansão da urbanização, em relação aos efeitos sobre inundações urbanas. A intensificação da chuva possui efeito distribuído em toda a bacia, ao passo que a expansão de áreas impermeáveis agrava especificamente a contribuição do escoamento superficial em áreas já tendencialmente críticas, onde as inundações são mais severas e o risco mais alto. A pesquisa contribui para o desenvolvimento de soluções de drenagem urbana na medida em que oferece subsídios para se

analisar projetos e apontar a melhor solução projetual dentro de uma perspectiva de incerteza no longo prazo, podendo auxiliar inclusive, na construção de propostas mais resilientes.

Palavras-chave: Sistema de drenagem urbana, Mudanças climáticas, Drenagem sustentável, Inundações.

ABSTRACT

CARVALHO, Carolina Lopes. **Analysis of the threat of floods in the face of adverse future scenarios of climate change effects and increased urbanization** Rio de Janeiro, 2024. Dissertation (Master's of Science degree – M.Sc.) – Programa de Engenharia Urbana, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The changes in climate dynamics, combined with increasing and disorderly urbanization, are identified as the main causes of the growing socio-environmental risk scenarios to which society is exposed. The effects of climate change and the consequences of rapid urbanization highlight the need for more resilient cities. In this discussion, however, the relevance of urban planning and land use is not always adequately valued. The aim of this research is to comparatively assess the effects of climate change and uncontrolled urbanization, to evaluate their relative importance in an already densely occupied environment that is still subject to informal urbanization on its vegetated slopes. Future scenarios of worsening adverse effects of climate change and urbanization of a basin, for the case study of the Jardim Botânico neighborhood, located in the city of Rio de Janeiro, are proposed for systematic comparison purposes. To achieve this goal, the construction of future scenarios proposes: increased rainfall intensity and average sea level as consequences of climate change; the expansion of informal occupation in the upper part of the basin. The scenarios considered for the study area were simulated in the MODCEL hydrodynamic mathematical model. The explored hypothesis is that the impact caused by the expansion of informal occupation on the increase in the magnitude of floods is significant compared to the consequences of climate change and should be equally considered, since land management is feasible and constitutes a current concern that can be effectively addressed. The results demonstrate that the consequences of climate change may be less severe than the expansion of urbanization concerning the effects on urban flooding. The intensification of rainfall has a distributed effect throughout the basin, while the expansion of impermeable areas specifically aggravates the contribution of surface runoff in areas already tendentially critical, where floods are more severe, and the risk is higher. The research contributes to the development of urban drainage solutions by providing subsidies to analyze projects and point out the best design solution within a long-term uncertainty perspective, potentially assisting in the construction of more resilient proposals.

Key-words: Urban drainage system, Climate change, Resilience, Sustainable drainage, Flood.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Definições de cheia, enchente, vazante e inundação.	24
Figura 2 – Perfil esquemático de enchente, inundação e alagamento.	25
Figura 3 – As componentes do risco de inundações	28
Figura 4 – Gestão de águas urbanas ao longo do tempo.	36
Figura 5 – Aumento das concentrações de GEE na atmosfera de 1850 a 2019.	40
Figura 6 – Projeções para o aumento do NMM em centímetros até o ano de 2100 associadas a quantidade de emissão de GEE (muito alta, alta, intermediária, baixa, muito baixa).	41
Figura 7 – Mudanças projetadas de temperatura diária máxima do ano, umidade da coluna do solo total média do ano CMIP e precipitação diária máxima do ano a níveis de aquecimento global de 1,5°C, 2°C, 3°C, e 4°C em relação a 1850–1900. Mudança de temperatura máxima do ano (°C) simulado (a), (b) umidade da coluna do solo média do ano (desvio padrão), (c) mudança de precipitação diária máxima do ano (%). As mudanças correspondem às mudanças medianas do multimodelo da CMIP6. Nos painéis (b) e (c), grandes mudanças relativas positivas em regiões secas podem corresponder a pequenas mudanças absolutas. No painel (b), a unidade é o desvio padrão da variabilidade interanual da umidade do solo durante 1850–1900. O desvio padrão é uma métrica amplamente utilizada para caracterizar a gravidade da seca. Uma redução projetada na umidade do solo média por um desvio padrão corresponde às condições de umidade do solo típicas das secas que ocorreram aproximadamente uma vez a cada seis anos durante 1850–1900.	42
Figura 8 – Evolução da relação das cidades e inundações.	54
Figura 9 – Modelo conceitual da interação entre fatores climáticos e socioeconômicos que conduzem ao risco de inundações futuras de uma bacia específica.	57
Figura 10 – Mapa das bacias hidrográficas da cidade do Rio de Janeiro.	64
Figura 11 – Hidrografia da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas.	65
Figura 12 – Processo de aterramento e evolução da ocupação urbana na Lagoa Rodrigo de Freitas.	66
Figura 13 – Afluentes da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas.	68
Figura 14 – Delimitação da Bacia do Rio dos Macacos e seus afluentes sobre foto aérea.	70
Figura 15 – Comporta do Rio dos Macacos localizada Rua General Garzón fechada na primeira imagem, e aberta na segunda imagem.	73
Figura 16 – Pontos de alagamento na Bacia do Rio dos Macacos de acordo com o PDMAP.	75

Figura 17 – Rua Alberto Ribeiro, Chácara do Algodão.	79
Figura 18 – Delimitação da APAC Chácara do Algodão (1) e Jardim Botânico (2).	81
Figura 19 – Delimitação da APAC do Hipódromo da Gávea.	81
Figura 20 – Localização do Parque Nacional da Tijuca, na cidade do Rio de Janeiro, com indicações dos setores. A -Floresta da Tijuca; B -Serra da Carioca; C -Pedra Bonita/Pedra da Gávea; e D -Pretos Forros e Covanca.....	82
Figura 21 – Tendência do crescimento de incertezas no tempo.....	84
Figura 22 – Modelo conceitual do projeto de vulnerabilidade para os municípios do ERJ....	85
Figura 23 – Índice de Cenário Climático relativo à precipitação para o cenário A1FI.....	88
Figura 24 – Índice de Cenário Climático relativo à precipitação para o cenário A1T.....	89
Figura 25 – Ocupação urbana atual da Bacia do Rio dos Macacos.....	92
Figura 26 – Simulação da expansão máxima da urbanização informal da Bacia do Rio dos Macacos (cenário U800).....	92
Figura 27 – Diagrama da metodologia de simulação de cenários futuros.....	97
Figura 28 – Sobreposição de informações obtidas em GIS para a Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas.	99
Figura 29 – Divisão de células do modelo da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas.....	100
Figura 30 – Hietograma da chuva dos dias 8 e 9 de abril de 2019.....	102
Figura 31 – Hietograma da chuva de projeto para TR25 no Jardim Botânico.	104
Figura 32 – Resultado do modelo de células para uma chuva de TR25 considerando o cenário atual – C0U0.....	105
Figura 33 – Mancha de inundação com distribuição geográfica sobre foto aérea da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas para uma chuva de TR25 considerando o cenário atual – C0U0..	105
Figura 34 – Mapa de pontos de referência de áreas inundadas numerados de 1 a 8.....	106
Figura 35 – Altura da lâmina de inundação para os 8 pontos críticos da área de estudo para os cenários de aumento dos efeitos adversos das mudanças climáticas.....	109
Figura 36 - Altura da lâmina de inundação para os 8 pontos críticos da área de estudo para todos os cenários.....	111
Figura 37 - Incremento da altura da lâmina de inundação no ponto 3 da bacia (Rua Jardim Botânico) para todos os cenários de simulação.	113
Figura 38 – Recorte da Bacia Hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas com a localização das comportas e elevatória operadas pela Rio-Águas.....	115
Figura 39 – Funcionamento operacional das comportas da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas em tempo seco.	116

Figura 40 – Funcionamento operacional das comportas da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas durante as chuvas.....	117
Figura 41 – Comporta da Rua General Garzón em situação aberta.	118
Figura 42 – Diagrama de cenários de simulação com correção da comporta.	119
Figura 43 – Área com lâmina de inundação reduzida a partir da abertura da comporta e correção da seção hidráulica da Rua General Garzón.	120
Figura 44 – Aplicação do IRES para cada cenário simulado.	128
Figura 45 – Metodologia para identificar o melhor projeto.	129

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Fases históricas da drenagem urbana.	33
Quadro 2 – Medidas estruturais em drenagem urbana.....	56
Quadro 3 – Cursos d'água que compõem a Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas.....	67
Quadro 4 – Dados de Temperatura e Precipitação para cada Município do ERJ.	86
Quadro 5 – Precipitação acumulada em intervalos de 15 minutos para as chuvas com acréscimo de intensidade para os cenários C5, C10 e C20 referentes aos efeitos adversos das mudanças climáticas.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Déficit Habitacional Total por situação de domicílio e Déficit Habitacional Relativo – Brasil, grandes regiões, UF e regiões metropolitanas (2019).....	51
Tabela 2 – Caracterização das sub-bacias do Rio dos Macacos.....	75
Tabela 3 – Altura da lâmina de inundação para os pontos críticos da bacia para os cenários do eixo estressor de mudanças climáticas.	108
Tabela 4 – Altura da lâmina de inundação para os pontos críticos da bacia para os cenários do eixo estressor de expansão da urbanização informal.....	110
Tabela 5 – Altura da lâmina de inundação para os pontos críticos da bacia para todos os cenários simulados.....	112
Tabela 6 – Altura da lâmina de inundação para os pontos críticos da bacia para os cenários C0U0 (comporta fechada) e C0M0U0 (comporta aberta com correção da seção hidráulica).	120
Tabela 7 – Altura da lâmina de inundação nos pontos críticos da bacia para os cenários C0U0, C20U0, C0U800 e C20U800.....	121
Tabela 8 – Altura da lâmina de inundação nos pontos críticos da bacia para os cenários C0M0U0 (cenário atual com comporta aberta); C20M30U0 (cenário de comporta aberta sob os estresses das mudanças climáticas – aumento da intensidade das chuvas em 20% e aumento do NMM em 0,30m); C0M0U800 (cenário de comporta aberta com aumento da urbanização informal em 800%); C20M30U800 (cenário de comporta aberta sob os estresses das mudanças climáticas e expansão da urbanização informal simultaneamente).	121

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1.	CONTEXTO	17
1.2.	OBJETO	20
1.3.	HIPÓTESE	20
1.4.	OBJETIVOS.....	20
1.4.1.	Objetivo geral.....	20
1.4.2.	Objetivos específicos.....	21
1.5.	RESUMO DA METODOLOGIA	21
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1	CONCEITUAÇÃO DOS TERMOS	23
2.2	A ÁGUA E A FORMAÇÃO DAS PRIMEIRAS CIVILIZAÇÕES E CIDADES	29
2.3	HISTÓRICO DA DRENAGEM URBANA	31
2.4	OS IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO.....	36
2.5	MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	40
2.6	OS DESASTRES SOCIONATURAIS	45
2.7	OS DESASTRES SOCIONATURAIS E O CONTEXTO HABITACIONAL NO BRASIL 48	
2.8	MEDIDAS DE CONTROLE ESTRUTURAIS E NÃO ESTRUTURAIS	53
2.1.1.	Medidas estruturais	55
2.1.2.	Medidas não-estruturais	56
2.9	“ <i>FAIL-SAFE X SAFE-TO-FAIL</i> ”: MUDANÇA DE PARADIGMA	58
3.	ESTUDO DE CASO – BAIRRO JARDIM BOTÂNICO, RIO DE JANEIRO	63
3.1.	A HIDROGRAFIA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO	63
3.2.	CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA LAGOA RODRIGO DE FREITAS 65	
3.3.	CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIO DOS MACACOS	69

3.4.	HISTÓRICO DE OCUPAÇÃO DO BAIRRO JARDIM BOTÂNICO	76
4.	ESTRUTURA METODOLÓGICA.....	83
4.1.	MÉTODOS.....	83
4.1.1.	Método de simulação de efeitos das mudanças climáticas.....	83
4.1.2.	Método de simulação de expansão da urbanização informal	90
4.1.3.	Método de mensuração da ameaça de inundações	93
4.2.	FERRAMENTAS.....	93
4.3.	QUADRO METODOLÓGICO.....	96
5.	RESULTADOS.....	98
5.1.	CONSTRUÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO	98
5.2.	RESULTADO DO CENÁRIO ATUAL	104
5.3.	RESULTADOS DOS CENÁRIOS FUTUROS.....	107
5.3.1.	Cenários de efeitos adversos das mudanças climáticas.....	107
5.3.2.	Cenários de expansão da urbanização informal	110
5.3.3.	Cenários combinados e isolados de expansão da urbanização informal e efeitos adversos das mudanças climáticas	112
5.3.4.	Cenários com correção da comporta	114
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	123
6.1.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	126
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO

O equilíbrio ambiental nas cidades é um dos temas mais sensíveis e de alta complexidade de resolução. A percepção de segurança que sustentava a sociedade industrial está sendo substituída pelas incertezas e riscos herdados dos processos da industrialização. Esse estado de crise faz um alerta para a vulnerabilidade dos sistemas socioeconômicos e físico-espaciais urbanos (LEMOS, 2010). Dentre vários outros processos associados à formação de aglomerados urbanos, a industrialização foi um catalisador significativo para a formação e o desenvolvimento das cidades, bem como para o fenômeno de valorização das áreas urbanas ao longo do tempo. À medida que as cidades se expandiram para acomodar o crescimento industrial e populacional, surgiram desafios significativos, como a poluição ambiental, a degradação dos recursos naturais e a segregação socioespacial. Somadas às questões urbanas, as alterações das dinâmicas climáticas apontam para alterações na frequência e magnitude de eventos extremos (IPCC, 2022). Esses fatores, em conjunto, contribuem para a ocorrência crescente de desastres socionaturais.

Este trabalho propõe tratar em específico os fenômenos de inundações e seus fatores de agravamento em áreas urbanas. Nesse contexto, vários são os fatores que podem ser citados para explicar a persistência de problemas relacionados a enchentes, no entanto, dois deles geralmente aparecem como os mais proeminentes, referindo-se às mudanças climáticas que aumentam a intensidade das chuvas; e aos processos de crescimento urbano que levam a mudanças no uso e cobertura do solo que alteram significativamente o escoamento da água (ARNONE *et al.*, 2018; IPCC, 2014; KASPERSEN *et al.*, 2017; MAHMOOD *et al.*, 2017; WU *et al.*, 2017; YIRSAW *et al.*, 2017; ADNAN *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2023). Nos últimos anos, as mudanças climáticas têm recebido cada vez mais atenção como um dos fatores mais importantes que influenciam a ocorrência de enchentes de gravidade significativa. No entanto, a urbanização descontrolada, a expansão urbana e a falta de infraestrutura devem ser consideradas, pelo menos, no mesmo nível de preocupação, uma vez que vários autores reconhecem que as mudanças no uso do solo têm um enorme potencial para intensificar as inundações. Entretanto, parece que essa conscientização não é a mesma relacionada às consequências das mudanças climáticas.

Nesse sentido, os efeitos das mudanças climáticas podem afetar o fenômeno natural dos eventos de chuva, aumentando as inundações. Em contrapartida, o planejamento inadequado

do uso da terra com mudanças insustentáveis pode agravar a geração de escoamento, aumentando também as inundações, mesmo que a precipitação seja a mesma. Portanto, as inundações são consequência da intensidade das chuvas que atingem uma bacia hidrográfica, e sua interação com o uso do solo e a paisagem local determinará a criticidade dos eventos de inundação. Sendo assim, se a intensidade da chuva aumentar e o crescimento urbano ocorrer de forma indesejada, as inundações certamente se agravarão. Em cidades costeiras a elevação do nível médio do mar (NMM) também traz um fator de preocupação, uma vez que este cenário configura em uma maior dificuldade de descarga dos cursos d'água, ocasionado pelo incremento do remanso de níveis do mar cada vez maiores.

As inundações urbanas têm grandes impactos socioeconômicos adversos e podem causar interrupções nos serviços da cidade (por exemplo, transporte, esgoto, comunicação e fornecimento de eletricidade) e danos à infraestrutura urbana (HLODVERSDOTTIR *et al.*, 2015; KARAMOUZ *et al.*, 2011; WU *et al.*, 2017; YIN *et al.*, 2016). Nesse contexto, o sistema de drenagem ocupa uma posição intermediária entre as necessidades naturais e urbanas, oferecendo uma área de inundação e, ao mesmo tempo, mantendo a cidade segura e funcional. A dinâmica da água desempenha um papel importante na ordenação do uso do solo, comprovando a importância do sistema de drenagem como um elemento preliminar de estruturação para apoiar um planejamento urbano sustentável, ordenado de acordo com as restrições ambientais definidas pela dinâmica da água (OLIVEIRA, 2022).

As mudanças do clima são apontadas como um fator de grande influência na frequência e magnitude de chuvas extremas, além do incremento do NMM; no entanto, ainda não existe uma ferramenta eficaz, por consenso científico, que mensure a extensão de seus efeitos. A urbanização, por sua vez, constitui uma das ações antrópicas que certamente geram grandes impactos ambientais e que conseguimos construir uma base de dados confiável para apoio em simulações matemáticas que são capazes de mensurar os efeitos adversos de sua expansão quando não planejada.

Espera-se que as mudanças climáticas ocorram em todo o mundo (IPCC, 2022; KHARIN *et al.*, 2013). Vários estudos indicam tendências de intensificação das chuvas em locais distintos do globo (BRÊDA *et al.*, 2020; KARKI *et al.*, 2017; MUKHERJEE *et al.*, 2018; TABARI, 2020; Y. ZHANG *et al.*, 2019). O aumento da intensidade das chuvas tem um grande potencial para agravar os problemas de inundação, pois volumes maiores de água atingirão os ambientes urbanos e colocarão à prova as estratégias atuais de drenagem urbana. Além disso,

os efeitos da mudança climática nos ciclos urbanos da água podem agravar ainda mais os problemas de inundação nas áreas costeiras devido ao aumento do NMM. Por outro lado, durante as estações secas, espera-se que a estiagem e consequente escassez de água também sejam mais frequentes, gerando consequências socioeconômicas e ambientais negativas.

Embora as mudanças climáticas possam aumentar os volumes de água que atingem a superfície urbana, as mudanças no uso e cobertura do solo devido à urbanização podem contribuir muito para o aumento do escoamento superficial, afetando o outro lado do problema, relacionado à forma como a chuva interage com a bacia hidrográfica. Embora as coberturas naturais do solo ofereçam várias oportunidades para que a água se infiltre ou se acumule na bacia hidrográfica, as áreas urbanas comumente interrompem processos hidrológicos importantes, reduzindo a interceptação, a infiltração e a retenção, favorecendo a permanência da água na superfície e seu deslocamento mais rápido (CHOW *et al.*, 1998; OGDEN *et al.*, 2011; SHENG e WILSON, 2009). Estudos já demonstraram que as mudanças no uso do solo contribuíram significativamente para agravar os problemas de inundação em vários locais. Considerando que é provável que a população urbana se expanda no futuro (ONU, 2019; ZHANG, 2016), é possível supor que as cidades também estejam propensas a se expandir e densificar, e consequentemente enfrentar inundações mais críticas.

De acordo com vários estudos, como o realizado Yang *et al.* (2011), as respostas às inundações variam significativamente de acordo com a configuração urbana. Portanto, as projeções de possíveis mudanças no uso e cobertura do solo derivados do processo de expansão da urbanização, considerando os aspectos locais, surgiram como elementos fundamentais na modelagem de risco de inundação. Pesquisas que consideram possíveis mudanças do uso e cobertura do solo como DU *et al.* (2015), MUSTAFA *et al.* (2018) e NIGUSSIE e ALTUNKAYNAK (2019), demonstraram a importância dos processos de urbanização para o risco de inundação, indicando diferenças significativas dos aspectos de inundação ao considerar cenários distintos de dinâmica urbana.

Por fim, espera-se que tanto as mudanças do clima quanto a expansão de áreas urbanas contribuam para o aumento progressivo de inundações urbanas. O presente trabalho propõe explorar esses dois eixos estressores do sistema de drenagem urbana a partir de simulações de cenários futuros com o intuito de gerar resultados que abram frente para a discussão de suas consequências. Para efeito de comparação, os dois fatores de agravamento das inundações aqui

expostos serão analisados em diferentes configurações de crescimento, como forma de considerar a incerteza ditada pelo tempo na evolução desses processos.

1.2. OBJETO

O objeto de estudo dessa pesquisa consiste em uma área urbana consolidada: o bairro do Jardim Botânico, na cidade do Rio de Janeiro. A Bacia do Rio dos Macacos, que é a principal bacia da área estudada, não possui uma quantidade significativa de terrenos livres remanescentes (principalmente nas proximidades da sua foz), e, atualmente, apenas as ocupações informais nas encostas possuem possibilidades reais de expansão. Essa expansão se dará a depender do nível de fiscalização por parte do poder público para evitar que áreas impróprias para construção venham a ser habitadas. As ocupações informais de favelas geralmente possuem pouca ou nenhuma infraestrutura urbana de drenagem e esgotamento sanitário. Na ocorrência de chuvas, as consequências desse modelo de ocupação são o aumento do escoamento superficial – portanto o aumento das inundações nas áreas mais baixas da bacia –, risco de ocorrência de movimentos de massa e diminuição da qualidade da água que chega aos receptores.

1.3. HIPÓTESE

A hipótese explorada é a de que o impacto causado pela expansão da ocupação informal no aumento da magnitude das inundações é significativo frente às consequências das mudanças climáticas e deve ser igualmente considerado, uma vez que a gestão do território é factível e constitui uma preocupação presente, sobre a qual se pode atuar efetivamente. Portanto, este trabalho propõe investigar, através de um trabalho prático aplicado ao objeto de estudo previamente definido, se os efeitos da urbanização podem ter impactos equivalentes ou superiores no agravamento de inundações quando comparado aos das mudanças climáticas.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa é fazer uma comparação relativa dos efeitos de mudanças climáticas e de uma urbanização descontrolada, de forma a avaliar sua importância relativa em um ambiente já densamente ocupado, mas ainda passível de uma urbanização informal em suas encostas vegetadas. Cenários futuros de agravamento de efeitos adversos das mudanças

climáticas e da urbanização de uma bacia, para o estudo de caso do bairro Jardim Botânico, localizado na cidade do Rio de Janeiro, são propostos para fins de uma comparação sistemática.

A proposta deste estudo tem é fornecer uma estrutura para analisar cenários futuros de inundações, considerando os efeitos dos principais fatores de agravamento de enchentes: mudanças climáticas que levam à intensificação da chuva e a elevação do nível médio do mar; e a urbanização não planejada que leva a mudanças descontroladas no uso e cobertura do solo, modificando criticamente o ciclo da água. Esses fatores serão avaliados individualmente e de forma combinada para permitir identificar como o agravamento dos problemas de inundação se dá diante das incertezas do futuro. O resultado evidenciará a importância de cada um desses aspectos, que é uma das principais contribuições desta pesquisa: a aplicação da estrutura para prospectar respostas apontará os possíveis problemas críticos a serem enfrentados e orientará adequadamente os esforços para reduzir a principal fonte de problemas em cenários futuros. Através do mapeamento da importância dos processos de urbanização informal e de mudanças climáticas sobre uma bacia urbanizada, em termos de agravamento de alagamentos e inundações, pretende-se confirmar a hipótese de trabalho, enunciada no item 1.3.

1.4.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

1. Desenvolver um referencial teórico sobre os temas principais abordados na presente dissertação;
2. Definir prospecções de tendências de aumento da intensidade das chuvas e aumento do nível do mar embasadas na literatura científica para serem aplicadas aos cenários de simulação;
3. Delimitar uma mancha de expansão urbana fictícia para a área de estudo baseada nos padrões de urbanização informal na cidade do Rio de Janeiro, estritamente para efeito de simulação;
4. Simular matematicamente diversos cenários de efeitos adversos das mudanças climáticas e expansão da urbanização de forma descontrolada aplicados a Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas, no Rio de Janeiro.

1.5. RESUMO DA METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste nas seguintes etapas:

1. Revisão da literatura acerca do tema, buscando sustentação teórica para o trabalho;
2. Definição da área do bairro Jardim Botânico como estudo de caso;

3. Simulação de diversos cenários futuros de mudanças climáticas e expansão de áreas urbanas informais para comparação das consequências introduzidas por cada um destes processos, tanto separadamente como simultaneamente;
4. Simulações dos resultados de uma intervenção na infraestrutura de drenagem já existente;
5. Discussão dos resultados obtidos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCEITUAÇÃO DOS TERMOS

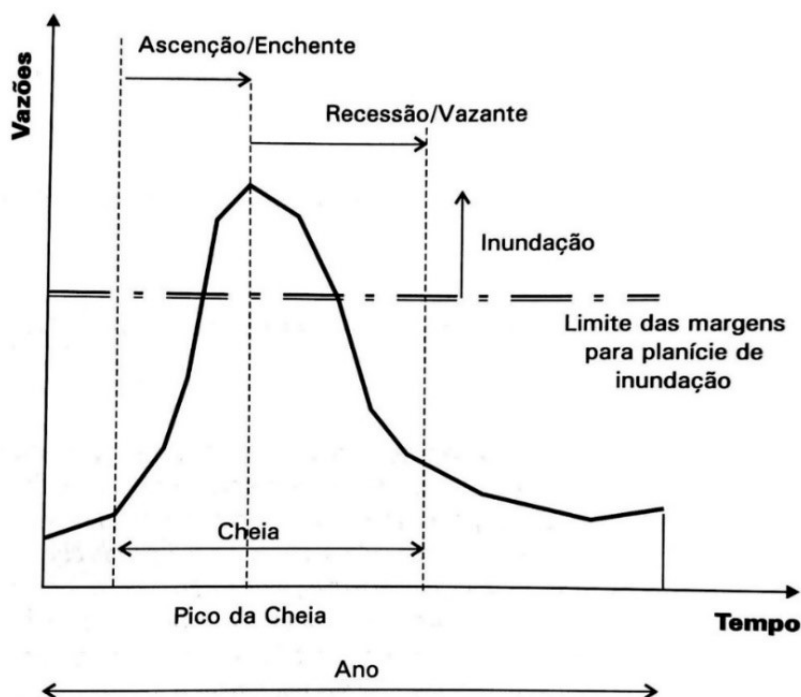
Para compreender os fenômenos que podem ocorrer a partir das chuvas, é importante saber diferenciar cada um dos termos e quais processos de formação estão associados a eles. As definições técnicas dos termos no contexto das inundações, riscos e desastres hidrológicos são importantes para que se tenha uma compreensão clara do que está sendo falado. Neste trabalho, as seguintes definições serão adotadas:

Enchente é o aumento do nível da água no canal de drenagem em função do aumento da vazão, atingindo a cota máxima do canal até o limite do seu transbordamento. Essa elevação no nível de água de um rio, acima de sua vazão normal, caracteriza a ascensão no hidrograma de cheia, enquanto a recessão do hidrograma representa a **vazante**.

As **inundações** são fenômenos naturais, resultantes do extravasamento do corpo hídrico em períodos de cheia, podendo ser bruscas ou graduais. As inundações graduais estão relacionadas com os trechos mais planos dos rios, com ocupação lenta das planícies de inundação e o alagamento de grandes áreas (MIGUEZ *et al.*, 2018).

Na Figura 1 é possível visualizar um gráfico esquemático que relaciona a vazão no tempo para melhor compreensão dos termos.

Figura 1 – Definições de cheia, enchente, vazante e inundação.



Fonte: MIGUEZ *et al.*, 2018, p.34.

As **enxurradas** são as inundações bruscas que ocorrem em rios de declividade mais acentuada e que têm grande poder destrutivo, por ação de arraste motivado pela combinação de altas velocidades e lâminas d'água, podendo transportar sedimentos em grande quantidade, e de grande dimensão, e derrubar casas, carregar pessoas e bens, danificar ruas e romper redes de infraestrutura (MIGUEZ *et al.*, 2018).

O **alagamento** é o acúmulo de água em áreas urbanas ocasionado por falha de funcionamento do sistema de drenagem urbana. Embora as inundações causem alagamentos, o termo geralmente se refere a falhas dos sistemas de microdrenagem urbana. Dessa forma, distingue-se o fenômeno típico de falha das redes de drenagem, em áreas urbanas, das inundações naturais, associadas a cursos d'água (MIGUEZ *et al.*, 2018).

Na Figura 2 é possível visualizar um perfil esquemático de como esses fenômenos se comportam na cidade.

Figura 2 – Perfil esquemático de enchente, inundação e alagamento.



Fonte: Defesa Civil de São Bernardo do Campo/SP, 2011.

O **Tempo de Recorrência (TR)** de uma chuva representa o intervalo de tempo em que se espera, estatisticamente, que um evento de chuva seja igualado ou superado. Portanto, o tempo de recorrência é, por definição o inverso da frequência esperada para uma chuva de determinada magnitude (MIGUEZ *et al.*, 2018).

O **tempo de concentração (tc)** de uma bacia é o intervalo de tempo considerado a partir do início de uma chuva, de forma que toda a bacia hidrográfica passe a contribuir para a vazão em uma seção definida como referência para o estudo. Em outras palavras, é o tempo necessário para que toda a bacia hidrográfica esteja contribuindo para o escoamento superficial dessa seção (MIGUEZ *et al.*, 2016).

Risco é a combinação da possibilidade de um evento particular ocorrer (como uma inundação, por exemplo) e o impacto causado por esse evento (SAYERS *et al.*, 2013). Risco, portanto, tem duas componentes: a probabilidade de ocorrência de um evento que configura perigo, e a vulnerabilidade frente a essa ocorrência. Se uma dessas variáveis que compõem o risco for igual a zero, o risco será zero. O risco, portanto, está condicionado à existência de um perigo, ou seja, um evento-fonte de origem do risco, e aos danos que podem ser causados por este perigo a um sistema socioeconômico. No caso do risco de inundação, por exemplo, a chuva representa o indutor de perigo. No entanto, a simples ocorrência deste evento não determina a presença de risco, que também dependerá da sua passagem pela bacia, com a transformação da chuva em vazão, e da vulnerabilidade de pessoas e/ou bens que estão expostos e são passíveis de serem afetados e sofrerem danos.

A **probabilidade** de ocorrência de inundação reflete tanto a probabilidade de ocorrência do evento que representa a fonte original da inundação (neste caso, a chuva), quanto o caminho

que a água faz para gerar a inundação (SAYERS *et al.*, 2013). Isso significa dizer que a probabilidade aqui mencionada se refere a probabilidade de que as águas da enchente atinjam um determinado local na planície de inundação, levando em consideração o desempenho do sistema de intervenções local como as estruturas de drenagem e o próprio traçado urbano.

Perigo e Ameaça são termos que se referem usualmente a eventos físicos relacionados ao clima podendo causar perda ou prejuízo de vidas ou de bens (COPPE/UFRJ, 2016). São exemplos de perigos os escorregamentos de massa e as inundações, ambos provocados pela ameaça de chuvas fortes. O perigo, no caso de riscos hidrológicos, tem uma particularidade: o fenômeno natural deflagrador (ou ameaça) das inundações e alagamentos é a chuva, que por si só, não configura perigo. O processo de transformação de chuva em vazão, potencialmente pela susceptibilidade física da bacia a esse processo, conjugado pelo próprio caminho seguido pelos escoamentos, que favorece em maior ou menor medida a formação de áreas alagadas e inundações, é que de fato representa o perigo (MIGUEZ *et al.*, 2018).

Exposição é tudo aquilo (vidas e bens) que está presente em áreas em condição de serem afetadas adversamente por ameaças (COPPE/UFRJ, 2016). As consequências caso ocorram inundações reflete a vulnerabilidade de uma comunidade e a chance de que um determinado grupo seja exposto à inundação. A exposição quantifica o número de propriedades ou pessoas e habitats que podem ser expostos a um determinado evento de inundação, mas esse conceito não é tão simples: alguns componentes, como construções, podem ser considerados estáticos, mas outros, como pessoas, carros e animais selvagens podem ser dinâmicos, e podem ou não estar presentes na área no tempo de uma inundação onde o grau de exposição influenciará o risco, portanto a exposição ao risco será diferente dependendo da hora do dia em que ocorre a inundação (SAYERS *et al.*, 2013).

Vulnerabilidade é a propensão ou predisposição a ser adversamente afetado por determinada ameaça (COPPE/UFRJ, 2016). A vulnerabilidade pode ser definida como uma medição do grau de susceptibilidade a danos do fenômeno ou atividade perigosa para um determinado elemento. Se um sistema é aprimorado por medidas de proteção contra as cheias, ele pode sofrer danos menores, de modo que um sistema melhorado tem menos vulnerabilidade (TSAKIRIS, 2014). Vulnerabilidade descreve o potencial de um determinado receptor sofrer danos durante um determinado evento de inundação. Para avaliar a vulnerabilidade, três aspectos de suporte precisam ser considerados:

– A **suscetibilidade** descreve a propensão a sofrer danos durante um determinado evento de inundação. Isso inclui destruição de material, perda ou danos a flora ou fauna específica e morte ou ferimentos humanos;

– O **valor** externaliza o sistema utilizado para mensurar o grau de dano a um receptor. Por exemplo, o sistema pode adotar uma base econômica de desenvolvimento ou bem-estar para medir os impactos;

– A **resiliência** descreve a capacidade do sistema prejudicado por uma determinada inundação de se recuperar (SAYERS *et al.*, 2013).

A Resiliência

“é a capacidade de um sistema absorver impactos e manter suas funções e propósitos, isto é, sobreviver ou persistir em um ambiente com variações, incertezas. A forma como o sistema responde a determinada alteração é que vai determinar o grau de sua resiliência. Para que haja resiliência, é necessário que ele tenha diversas alternativas ou redundâncias, isto é, que possa sofrer uma grande perturbação e tenha como restaurar suas funções ou propósitos, passando pelos ciclos adaptativos, sem mudar de patamar. Isso não quer dizer que haja uma estabilidade estática que pode ser medida e avaliada ao longo do tempo” (HERZOG, 2013).

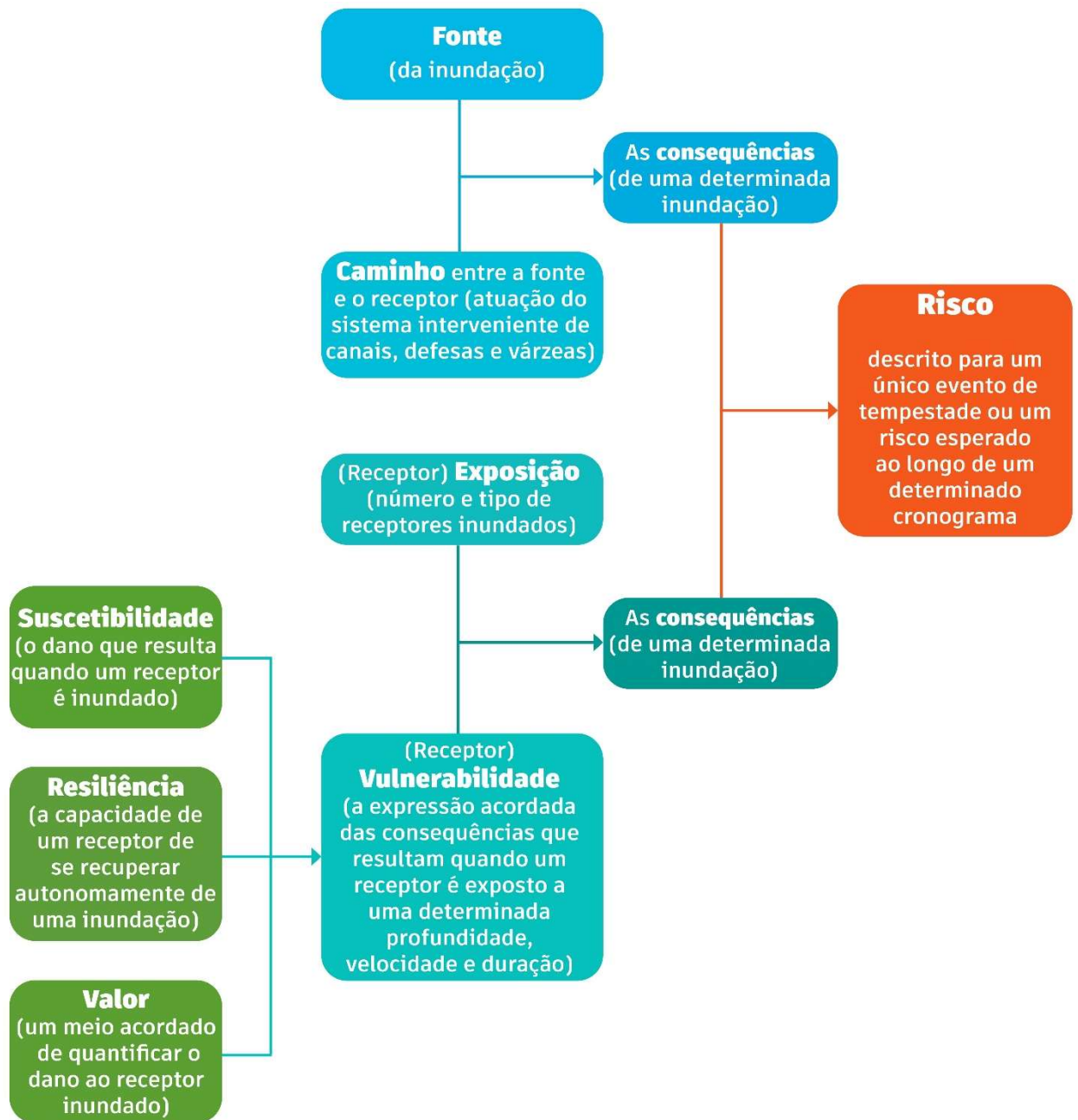
Por fim, a resiliência designa um termo referente a resistência flexível de um sistema, neste caso, a cidade. Ou seja, é a capacidade da cidade retornar ao seu equilíbrio após uma inundação, compreendendo-se o equilíbrio como algo fluido e mutável ao longo do tempo. Conhecer a vulnerabilidade de um sistema, portanto, torna-se fundamental para atuar na adaptação dos lugares no sentido de torná-los resilientes, seja ampliando sua capacidade adaptativa, seja reduzindo sua sensibilidade através de intervenções diretas na estrutura física dos sistemas, ou na remoção de populações ameaçadas (LEMOS, 2010).

A resiliência do sistema ecológico é interpretada como uma medida da integridade do sistema e é definida como a capacidade do sistema de manter sua estrutura e padrões básicos de comportamento (ou seja, persistir) através da absorção de choques ou perturbações sob condições dinâmicas (sem equilíbrio) Ao contrário dos sistemas ecológicos, os sistemas de engenharia são produto de invenção humana intencional e são projetados para fornecer serviços contínuos (ininterruptos) para a sociedade de maneira eficiente. A resiliência do sistema de

engenharia é, portanto, interpretada diferente da resiliência ecológica e se concentra em garantir continuidade e eficiência da função do sistema durante e após falha (HOLLING, 1996).

No caso das inundações, portanto, o risco está associado a probabilidade de ocorrência de uma inundação e suas consequências negativas. Esses componentes de probabilidade e seus componentes constituintes estão demonstrados abaixo na Figura 3.

Figura 3 – As componentes do risco de inundações



Fonte: Adaptado de SAYERS *et al.*, 2013.

2.2 A ÁGUA E A FORMAÇÃO DAS PRIMEIRAS CIVILIZAÇÕES E CIDADES

Historicamente, a formação de cidades sempre esteve associada a proximidade de fontes de abastecimento de água e energia. O surgimento das primeiras grandes civilizações se deu na presença de algum corpo hídrico, portanto é certo afirmar que a presença de água foi fundamental para os primórdios do desenvolvimento urbano, e é ainda hoje um fator de grande influência na fixação das populações nos territórios.

Antes mesmo do estabelecimento de civilizações complexas, a água era essencial para a sobrevivência básica dos primeiros grupos humanos. A necessidade de acesso a fontes de água potável para consumo, irrigação de cultivos e criação de animais determinava os locais onde os primeiros assentamentos humanos se desenvolviam. A água também desempenhava um papel crucial na alimentação, uma vez que a disponibilidade de recursos hídricos influenciava a diversidade de plantas e animais que podiam ser cultivados e criados. Sendo assim, a disponibilidade de água sempre foi um fator crucial na formação e crescimento das cidades ao longo da história (BENEVOLO, 1991).

O surgimento da agricultura marcou um ponto de virada na história humana, permitindo a produção de excedentes alimentares e o desenvolvimento de sociedades sedentárias. As primeiras civilizações, como a suméria, egípcia, mesopotâmica e indiana, surgiram em regiões onde a disponibilidade de água era abundante, como vales de rios e deltas. Os sistemas de irrigação, construídos para controlar o fluxo de água para as áreas agrícolas, foram fundamentais para o sucesso dessas civilizações antigas, possibilitando o cultivo de grandes quantidades de alimentos e o crescimento populacional. Considerando a história oriental, a Mesopotâmia é considerada um dos berços da civilização da antiguidade. Essa região está localizada no Oriente Médio, mais precisamente em uma região conhecida como a “região do crescente fértil”. A Mesopotâmia corresponde a uma área que se inicia no Rio Nilo, no Egito, e se estende até os rios Tigre e Eufrates, abrangendo também a região do Rio Jordão. A própria etimologia da palavra Mesopotâmia significa “região entre rios” (*meso* do grego entre, e *potamia* do grego *potamos* que significa rio).

A Mesopotâmia, assim como a civilização do Egito Antigo, desenvolveu o chamado modo de produção asiático. Esse modelo econômico desenvolvido à época se organizava de forma que as terras eram pertencentes ao Estado e a principal atividade econômica era a agricultura de regadio, que consistia em uma forma de agricultura que dependia das cheias periódicas desses grandes rios. Com as cheias dos rios, a matéria orgânica era depositada nas

suas margens possibilitando a sua fertilização e gerando a produção agrícola e conseqüente desenvolvimento econômico.

Além de sustentar a agricultura, a água também serviu como meio de transporte e comunicação entre diferentes regiões, facilitando o comércio e o intercâmbio cultural. Os rios navegáveis e as rotas marítimas permitiram que as civilizações antigas estabelecessem redes comerciais complexas, trocando mercadorias, ideias e tecnologias. Tomando como referência a história ocidental, a presença de água foi igualmente importante para a formação de cidades. Durante a Antiguidade grandes cidades foram erguidas, sendo o maior exemplo delas a cidade de Roma. No caso de Roma, a drenagem das áreas úmidas às margens do Rio Tibre foi fundamental para o assentamento da cidade. Outros exemplos são as cidades portuárias como Alexandria, Constantinopla e Veneza, que prosperaram devido à sua localização estratégica em rotas comerciais marítimas, aproveitando a água como uma fonte de riqueza e poder.

Em síntese, o processo de formação das cidades ocorre desde os tempos do período neolítico e está vinculado às possibilidades de sobrevivência da humanidade fora do meio rural por meio da produção de excedentes alimentares, portanto, essa dependência entre cidades e rios se dava não apenas pela disponibilidade de água para consumo e para prática da agricultura, mas também pela facilidade de transporte através da navegação.

O abastecimento de água para consumo nas cidades, a veiculação e diluição de esgotos, a irrigação, a possibilidade de transporte, bem como o oferecimento de uma barreira de defesa natural são alguns dos múltiplos possíveis usos que sempre fizeram da água um recurso de grande importância (MIGUEZ *et al.*, 2012). A presença de água limpa e a gestão eficaz de resíduos eram essenciais para a saúde e higiene pública nas cidades antigas. Civilizações como os romanos desenvolveram avançados sistemas de aquedutos e esgoto para fornecer água potável e eliminar resíduos das áreas urbanas. A falta de acesso a água limpa e o saneamento precário contribuíram para a propagação de doenças e epidemias em muitas cidades antigas, destacando a importância da água para a saúde e bem-estar das populações urbanas.

Com o processo de urbanização que se intensificou a partir do século XVIII, o campo passou a ser dependente da cidade, pois é nela que as lógicas econômico-sociais que estruturam o meio rural são definidas. Porém, a cidade tal como conhecemos hoje, começou a ganhar contornos claros após o advento da Revolução Industrial. Esse processo de mudança do perfil de distribuição da população desenvolveu-se muito rapidamente: em pouco mais de 200 anos,

as cidades cresceram e se modificaram mais que em qualquer outro período da história (MIGUEZ *et al.*, 2016).

Há um paradoxo na relação entre as grandes cidades e o uso da água: a urbanização, acelerada após a era industrial, nem sempre foi acompanhada do planejamento necessário, nem do provimento da infraestrutura necessária, fatos que com frequência levam a problemas de degradação ambiental, afetando, em especial, a oferta dos recursos hídricos e deteriorando os ecossistemas associados à paisagem natural (MIGUEZ *et al.*, 2012).

A Revolução Industrial marcou uma mudança profunda na sociedade, provocando o aumento da disponibilização de bens e serviços gerados pela agricultura, pela indústria e pelas atividades terciárias, por efeito do progresso tecnológico e de um desenvolvimento econômico sem paralelos. O perfil das cidades muda, atraindo um fluxo migratório das áreas rurais, o que provoca crescimento rápido e sem controle, rompendo um equilíbrio secular, em que cada geração ocupava o lugar das anteriores e cumpria o mesmo destino (BENEVOLO, 2001).

Em resumo, a presença de água desempenhou um papel fundamental na formação e desenvolvimento das primeiras civilizações e cidades. Desde os primeiros assentamentos agrícolas até as grandes metrópoles contemporâneas, a água sempre foi um recurso indispensável. Reconhecer a importância da água na formação das civilizações antigas nos ajuda a compreender melhor os desafios e oportunidades enfrentados pelas sociedades modernas na gestão sustentável desse recurso.

2.3 HISTÓRICO DA DRENAGEM URBANA

Historicamente, o problema das inundações urbanas foi tratado como uma consequência direta do excesso de chuva, sem se considerar, necessariamente, o funcionamento da bacia hidrográfica como um sistema interrelacionado e interdependente. Esta visão levou a engenharia a buscar soluções locais, intervindo no efeito provocado pelas precipitações na bacia urbanizada, ou seja, na adequação do sistema de drenagem às novas vazões geradas pós-urbanização (REZENDE, 2018).

O projeto de drenagem deve, necessariamente, contemplar a bacia como um todo. O funcionamento da rede de drenagem, se ineficaz, pode vir a ser responsável por inundações severas, devido à falta de capacidade de escoamento para as águas concentradas sobre ela. Dentro deste contexto, pode-se perceber a importância do funcionamento conjunto, integrado e

harmônico das redes de micro e macrodrenagem e da relação desta última com o corpo receptor. Onde ocorre o adequado funcionamento integrado da rede, a microdrenagem é capaz de coletar, de forma distribuída sobre a bacia, as águas resultantes das chuvas, sem gerar alagamentos locais, levando-as, em seguida, até a rede de macrodrenagem, que, também com adequada capacidade, provê um escoamento seguro para as águas nela concentradas até sua descarga no corpo receptor (MIGUEZ *et al.*, 2012).

Os avanços técnicos na gestão da drenagem urbana estão associados diretamente à evolução da dinâmica da percepção hídrica. É possível delimitar três importantes fases da percepção humana sobre as águas pluviais ao longo do tempo. A primeira fase corresponde a drenagem urbana tradicional, quando o propósito da infraestrutura era controlar as águas para reduzir o impacto das cheias -período em que caracterizou-se por um modo antropocentrismo, insuficiente para superar os problemas de águas urbanas. A visão predominante da drenagem urbana à época era que sua função estava associada a coleta e afastamento imediato das águas pluviais, uma lógica na qual a água, como atributo pluvial, era indesejada, um problema e deveria ser eliminada rapidamente (RIGUETTO, 2009; CHRISTOFIDIS, 2018).

De acordo com Tucci (2005), durante o período em que o manejo de águas pluviais se dava dentro da lógica tradicional, é possível identificar diferentes fases. A primeira fase, conhecida como pré-higienista, foi caracterizada pela preocupação de fazer a captação em tempo seco, e direcionar os dejetos para fora das residências, seja através da utilização de fossas dentro dos próprios terrenos ou direcionando as águas sujas diretamente nas ruas. Na segunda fase se perpetuou a lógica higienista, em que o objetivo era tornar as áreas habitadas mais limpas. Essa fase foi marcada pela captação e despejo direto do esgoto em corpos hídricos através de adutoras, *in natura*, sem que passasse por qualquer tipo de tratamento - essa prática ainda é feita de forma indevida até os dias de hoje. Dentro da prática de lógicas tradicionais em drenagem, houve ainda, uma terceira fase, quando a partir do conhecimento adquirido a qualidade de água passou a ganhar forte relevância. Nessa época, o sistema separador completo de esgoto e drenagem nas cidades passou a ser visto como sinônimo de desenvolvimento urbano. Essa lógica levou a grandes obras civis para que a separação das águas de drenagem e esgoto fosse assegurada, de forma a garantir a segurança sanitária da população e corrigir as más práticas do que vinha sendo realizado até então. Essa visão, no entanto, acabou sendo simplista do ponto de vista da segurança hídrica, uma vez que os volumes de esgoto são insignificantes quando comparados aos volumes gerados pelo escoamento de águas pluviais.

É muito importante notar que o sistema de saneamento que se conhece hoje teve sucesso graças ao contexto no qual se desenvolveu: o século XIX é o século da higiene, do igualitarismo, do técnico-científico (a ciência e a técnica podem resolver tudo), do colonialismo (os recursos do mundo estão à disposição de poucos países desenvolvidos) e da primeira revolução urbana. Todos esses fatores proporcionaram os meios financeiros e técnicos e as justificativas político-filosóficas para a construção das redes de esgoto como se configuram hoje (ABELLO, 2004).

Posterior a isso, quando a sustentabilidade passou a ganhar largo espaço no debate mundial, as práticas em saneamento passaram por uma mudança de paradigma, em que o fator ecológico passou a ter grande relevância. Nesse momento, os princípios da sustentabilidade passaram a ser aplicados à drenagem urbana, marcado pela preocupação em garantir o tratamento da água e a conservação ambiental, o que até então, não eram temas que recebiam atenção. A qualidade da água passou a ser relevante não apenas do ponto de vista higienista, mas também, do ponto de vista da saúde do próprio recurso natural. No Quadro 1 as fases da drenagem urbana estão expostas associadas as suas características e consequências de acordo com Tucci (2005).

Quadro 1 – Fases históricas da drenagem urbana.

FASE	CARACTERÍSTICA	CONSEQUÊNCIA
<i>Pré-Higienista:</i> Até início do séc. XX	Esgoto em fossas ou diretamente nas ruas, sem coleta ou tratamento.	Epidemias e doenças com alta taxa de mortalidade.
<i>Higienista:</i> Até os anos 1970	<i>Tout à l'égout</i> - Transporte do esgoto junto às águas pluviais, por canalização dos escoamentos.	Redução das doenças e da mortalidade, degradação dos corpos d'água, contaminação dos mananciais.
<i>Corretiva:</i> Entre 1970 e 1990	Sistema separador absoluto, tratamento dos esgotos, amortecimento dos escoamentos pluviais.	Melhoria da qualidade da água dos rios, poluição difusa, obras de grande impacto.
<i>Desenvolvimento Sustentável:</i> Após 1990	Tratamento do escoamento pluvial, preservação do sistema natural, integração institucional.	Conservação ambiental, melhoria da qualidade de vida, controle das inundações.

Fonte: TUCCI (2005).

A partir da experiência adquirida nas práticas convencionais da engenharia, surgiu a necessidade de uma mudança no modelo de manejo de águas pluviais, uma vez que as medidas até então adotadas não estavam sendo suficientes para garantir o bom funcionamento da drenagem urbana. Com o surgimento do desenvolvimento sustentável e das preocupações

associadas às mudanças climáticas, tornou-se necessário aprimorar as práticas tradicionais em drenagem para uma nova lógica, que buscasse a harmonização com os ciclos da natureza e das águas e gerassem menor impacto ambiental. Diferente das fases caracterizadas por Tucci (2005), outros autores interpretam que os dois grandes marcos paradigmáticos em drenagem urbana se deram a partir da mudança da lógica da drenagem tradicional para drenagem sustentável, e depois, pela evolução para a prática de soluções baseadas na natureza. Portanto, no segundo período, denominada como drenagem urbana sustentável, houve uma evolução associada aos modos de gestão e de manejo das águas pluviais urbanas. Nesse momento, o foco passou a ser no controle das águas na fonte e a indução à infiltração e retenção das águas como opções de recompor as condições naturais do ciclo hídrico, reduzindo picos de cheias. Com isso, aumentando o tempo de concentração da bacia, os impactos aos ambientes aquáticos e meios urbanos imediatos foram minimizados (CHRISTOFIDIS, 2019). O terceiro período representou um salto a uma nova lógica, no qual passou a existir uma consciência ampliada no conhecimento da dinâmica das águas, quando se passou a utilizar Soluções baseadas na Natureza (SbN) para a gestão da água (RIGUETTO, 2009).

A abordagem de infraestrutura tradicional era baseada em pavimentos impermeáveis e drenagem direta, transportando rapidamente as descargas por meio de galerias e canais artificiais para corpos d'água receptores (JOHNSON, 2013). Porém, a infraestrutura tradicional não é simplesmente àquela associada a infraestrutura cinza, mas sim às técnicas de drenagem que objetivam acelerar o escoamento da água para fora da área inundada. O que se observou com o tempo, foi que essa abordagem de projeto transportava as inundações para as áreas mais baixas da bacia, fazendo, muitas vezes, com que o problema não fosse resolvido, mas deslocado.

Essa experiência abriu espaço para um novo paradigma na elaboração de projetos de drenagem, em que se passou a pensar em formas de captação de água na fonte de forma a atenuar a velocidade dos fluxos e aumentar o tempo de concentração da bacia. Assim, a infraestrutura verde e azul pode ser combinada com a infraestrutura cinza para otimizar o sistema de drenagem e oferecer o melhor em termos de redução do risco de inundação, prestação contínua de serviços e outros benefícios (THORNE *et al.*, 2018). Nesse sentido, a infraestrutura híbrida abre maiores possibilidades para resolução do problema de inundações urbanas de forma sustentável.

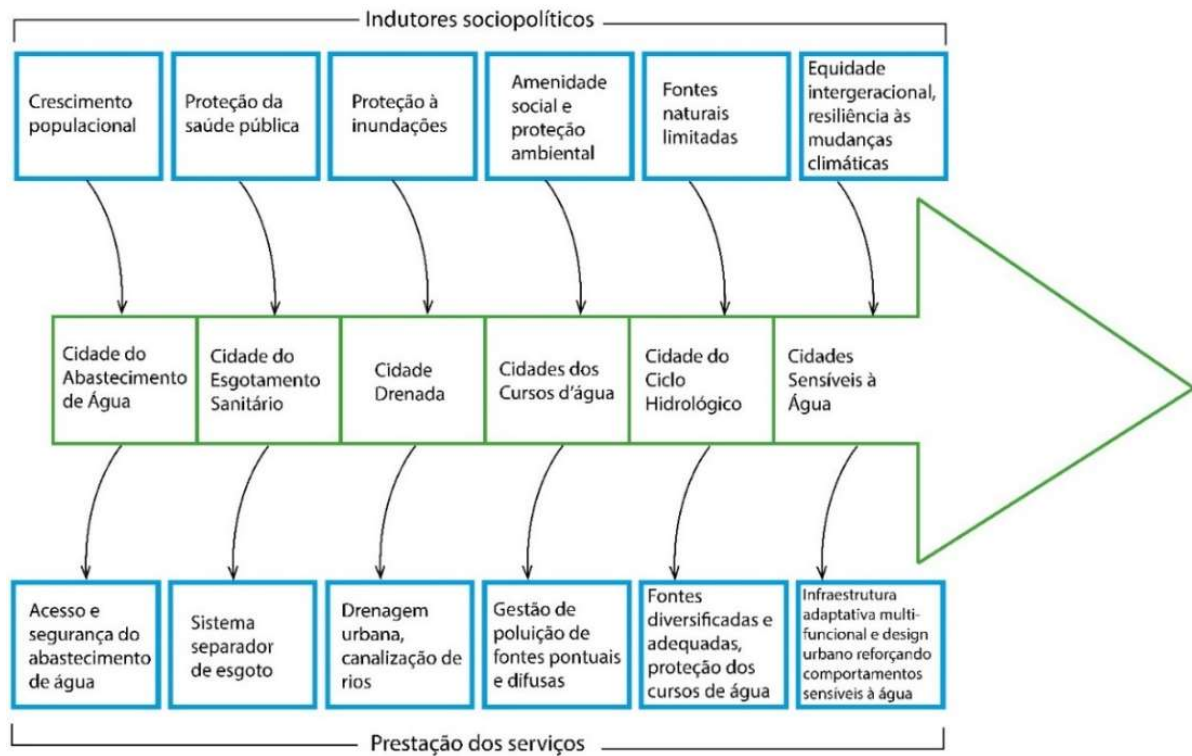
Apesar do conhecimento agregado ao longo do tempo e da evolução das técnicas utilizadas em projetos de drenagem, esses avanços se deram, na maioria das vezes, como forma de complementar as infraestruturas já existentes. Hoje, portanto, o que observamos em grande parte das cidades é uma sobreposição das soluções de drenagem originárias de todos os períodos descritos anteriormente. É preciso ressaltar, também, que essa evolução não fez com que soluções tradicionalmente utilizadas caíssem em desuso, mas sim, que hoje o conhecimento para se resolver os problemas de inundações estão ampliados, abrindo uma frente maior de soluções para que o sistema funcione da forma mais eficiente e sustentável possível.

Quando o crescimento urbano ocorre sem controle adequado ou sem planejamento prévio, ele acaba por inviabilizar a solução tradicional aumentando os volumes de água que chegam aos sistemas de drenagem ao longo do tempo, como consequência do aumento de áreas impermeáveis na bacia. Nesse cenário, investimentos adicionais para adequar a rede de drenagem às novas vazões de cheia são recorrentes e insustentáveis numa projeção para o futuro, gerando inúmeros transtornos para a urbanização já constituída (MIGUEZ *et al.*, 2016). Nesse contexto, emergiu o conceito de sustentabilidade em drenagem urbana, frequentemente associado a infraestrutura verde. O que o projeto sustentável busca não é necessariamente a adoção de medidas baseadas na natureza, mas sim a captação de água na fonte e a utilização de medidas de controle distribuídas pela bacia hidrográfica que pode ou não estar associado a técnicas dentro da lógica da infraestrutura verde.

Ao longo das últimas décadas, a concepção tradicional vem sendo complementada ou substituída por conceitos que buscam soluções sistêmicas para a bacia, com intervenções distribuídas, procurando resgatar padrões de escoamento próximos daqueles anteriores à urbanização. A nova abordagem agrega preocupações de manejo sustentável das águas pluviais urbanas, integrando-as com o próprio tratamento do espaço urbano. Medidas de armazenamento de água e incremento da infiltração parecem como alternativas para tratar as principais modificações introduzidas pelo crescimento da cidade sobre o ciclo das águas na natureza. Essas técnicas são chamadas de técnicas compensatórias, pois buscam justamente compensar os efeitos da urbanização sobre o ciclo hidrológico (MIGUEZ *et al.*, 2016). Práticas de desenvolvimento de baixo impacto e soluções baseadas na natureza, como aquelas compostas pelo uso de infraestrutura verde e azul (O'DONNELL *et al.*, 2020), são apresentadas como alternativas para responder às incertezas ambientais gerando menor impacto.

Cabe aqui, uma análise histórica acerca da evolução do processo de manejo de águas pluviais urbanas desde a fase da drenagem tradicional com o propósito de afastar as águas, passando pela drenagem sustentável, quando, com intuito de retardar o fluxo das águas são construídos reservatórios subterrâneos, até a fase atual quando são propostas soluções baseadas na natureza (SbN), e projetos de infraestrutura híbrida (CHRISTOFIDIS, 2019). Na Figura 4 é possível ver como a gestão de águas urbanas historicamente esteve suscetível a indutores sociopolíticos que norteavam as práticas em drenagem, e, conseqüentemente, o modelo de prestação de serviços de saneamento de cada período.

Figura 4 – Gestão de águas urbanas ao longo do tempo.



Fonte: Adaptado de BROWN *et al*, 2007.

2.4 OS IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO

No decorrer dos dois últimos séculos, foi observada elevada migração da população rural para as cidades, motivada pela Revolução Industrial. Em geral, essa migração ocorreu sem um planejamento urbano adequado, o que viria a acarretar sérias conseqüências no futuro para diversos setores da cidade.

No contexto da história humana, a urbanização teve seus marcos significativos. Desde as primeiras cidades antigas, como Uruk e Ur na Mesopotâmia, até as megacidades

contemporâneas como Tóquio e São Paulo, testemunhamos um crescimento exponencial da população urbana. Como dito anteriormente, esse crescimento está intrinsecamente ligado à industrialização, que impulsionou a migração em massa do campo para a cidade em busca de oportunidades de emprego e melhorias na qualidade de vida. No entanto, o processo de urbanização não é isento de desafios. As desigualdades sociais e espaciais em áreas urbanas são latentes em grande parte das cidades, onde bairros ricos coexistem com favelas e áreas degradadas. Essas disparidades são resultado de políticas urbanas segregacionistas e da concentração desigual de recursos (SANTOS, 2000).

Nesse sentido, a urbanização contemporânea é marcada por um rápido crescimento populacional nas cidades ao redor do mundo. Segundo dados do Banco Mundial (2022), a população urbana global aumentou de 751 milhões em 1950 para mais de 4 bilhões em 2020, representando mais da metade da população mundial. Nesse contexto de rápido crescimento urbano, a grande desigualdade social decorrente da globalização neoliberal evidencia a marginalização de comunidades urbanas periféricas (SANTOS, 2000).

Esse desenvolvimento urbano, que se deu de forma mais acelerada na segunda metade do século XX, acabou impactando o sistema urbano e sua população através do aumento da ocorrência de inundações e consequente perda de qualidade de vida. Este processo ocorre devido à falta de controle do espaço urbano que produz efeito direto sobre a infraestrutura. Diante desse rápido crescimento, o ciclo hidrológico sofre fortes alterações nas áreas urbanas devido, principalmente, à alteração da superfície e a canalização do escoamento gerando o aumento de ocorrência de inundações. Esse processo apresenta grave impacto nos países em desenvolvimento, onde a urbanização e as obras de drenagem são realizadas de forma insustentável (TUCCI, 2003).

Nesse contexto, são vários fatores que apontam para a tendência de aumento das inundações urbanas. O primeiro deles é o número crescente de pessoas que vivem em cidades já que a população mundial está se tornando cada vez mais urbana. De acordo com a Organização das Nações Unidas a população mundial que vive em áreas urbanas ultrapassou a população rural, e a projeção é de que a população urbana mundial crescerá tanto em termos absolutos quanto como fração de uma população global crescente (ONU, 2012). Entre 2011 e 2050, a população mundial deverá aumentar em 2,3 bilhões, de 7,0 bilhões para 9,3 bilhões. Ao mesmo tempo, a população que vive em áreas urbanas deverá

aumentar de 3,6 bilhões em 2011 para 6,3 bilhões em 2050. Isso representa um crescimento de 51% para 68% da população global.

Em qualquer bacia hidrográfica, nem toda a água que cai sobre sua superfície converte-se em escoamento. Parte da água será interceptada pela vegetação, outra parte evapora, infiltra ou armazena-se nas depressões do solo, a depender da topografia, uso e cobertura do solo. Para que seja feito o correto manejo das águas de escoamento, o conhecimento desses fenômenos é fundamental para que esforços maiores ou menores sejam alocados em termos técnicos e econômicos para cada área (ABELLO, 2004).

À medida que mais pessoas se mudam para as cidades, inevitavelmente áreas verdes são transformadas em áreas impermeáveis, aumentando o coeficiente de *runoff* e, à medida que mais pessoas vivem em áreas urbanas densamente povoadas, muitas vezes situadas em planícies de inundação e áreas costeiras baixas, a exposição ao risco é aumentada (HAMMOND *et al.*, 2013). A urbanização associada ao crescimento da população é uma das causas mais comuns do aumento das superfícies impermeáveis e da vulnerabilidade socioeconômica das áreas urbanas às inundações (HUONG e PATHIRANA, 2013; LI *et al.*, 2013; MAHMOUD e GAN, 2018).

“A urbanização gera grandes modificações no ambiente natural, especialmente alterando o uso do solo e agravando os problemas de enchentes, em um ciclo de causa e efeito que acumula importantes perdas econômicas e sociais, o que resulta em um processo de aumento contínuo da degradação do ambiente construído. A presença de rios e, mais diretamente, a presença de água, sempre foi um fator fundamental no desenvolvimento urbano entretanto, com o aumento da urbanização, a proximidade com a água resultou no excesso de escoamentos se convertendo em inundações no ambiente construído (MIGUEZ *et al.*, 2016)”.

Portanto, compreender a maneira pela qual o processo de urbanização age sobre as inundações é muito importante para um planejamento urbano adequado (REZENDE, 2018). Quando analisamos os efeitos do crescimento desordenado sobre o setor de drenagem urbana, diversos são os impactos negativos. A remoção da vegetação e a impermeabilização que segue esse processo, para implantação da urbanização, a regularização de superfícies e a introdução de sistemas artificiais de drenagem modificam significativamente o padrão de escoamentos, produzindo maiores e mais rápidas respostas dos escoamentos superficiais e menores oportunidades de infiltração, o que resulta em incremento de vazões de pico, redução de vazões

de base, redução do tempo de concentração da bacia e perda de ecossistemas fluviais (OLIVEIRA, 2018).

Hoje, enfrentamos um grande desafio que é adequar a infraestrutura às demandas dos territórios que se formaram ao longo do tempo. O projeto de desenvolvimento urbano, quando realizado sobre uma ocupação já estabelecida, é muito mais desafiador, pois possui recursos limitados, inclusive de áreas livres, e com condicionantes de natureza social e política preexistentes. Há assim um reduzido poder de intervenção no espaço, podendo encontrar também dificuldades devido a condições econômicas desfavoráveis e condições administrativas inadequadas herdadas de outros períodos predecessores, gerando um palco de difícil atuação, que demanda ferramentas apropriadas de suporte à decisão, para orientação de ações.

Na maioria das vezes, esta situação é agravada por problemas de ordem socioeconômica. As populações mais pobres e carentes acabam se instalando em condições de sub-habitação, em áreas de pouca ou nenhuma infraestrutura urbana, configurando situações de risco. A coleta e tratamento de esgotos nem sempre é feita de forma adequada, sendo estes despejos frequentemente lançados nos corpos d'água sem nenhum tratamento. A questão dos resíduos sólidos e do lixo urbano também agrava o problema de degradação ambiental dos sistemas hídricos (MIGUEZ *et al.*, 2012).

Assim, a cidade sofre com o agravamento das cheias, acumulando perdas econômicas e sociais diversas: danos em infraestrutura e nas habitações, degradação do ambiente natural e desvalorização do ambiente construído, propagação de doenças de veiculação hídrica, empobrecimento da população com perdas sucessivas, entre outros (MIGUEZ *et al.*, 2016). Com o contínuo crescimento das cidades as paisagens continuam sofrendo alterações, aumentando as áreas impermeáveis, tornando-se cada vez mais vulneráveis a inundações urbanas.

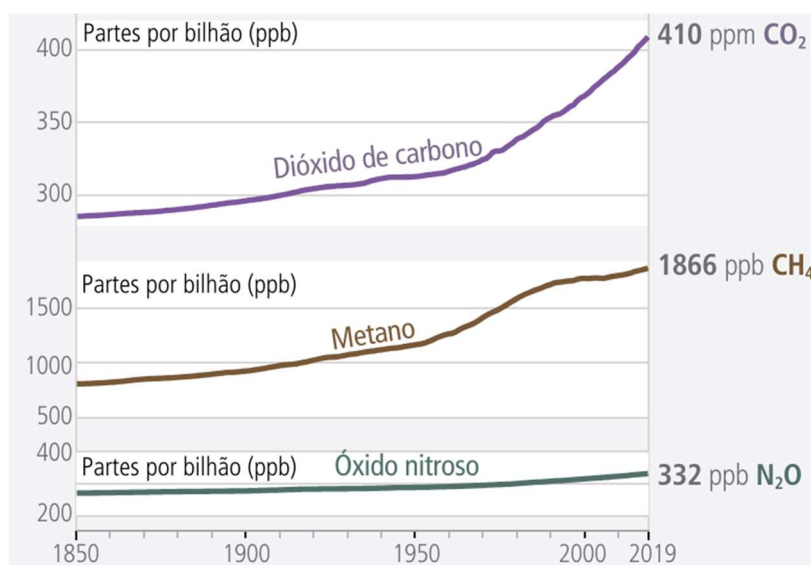
Em suma, a evolução da população urbana é um processo dinâmico e multifacetado, influenciado por uma variedade de fatores sociais, econômicos e políticos. Nesse sentido, torna-se necessário abordar a urbanização de maneira holística, considerando não apenas o crescimento quantitativo das cidades, mas também as questões de justiça social, igualdade e sustentabilidade. É necessário destacar a importância da participação da população e da governança democrática na construção de cidades mais justas e sustentáveis, enfatizando a necessidade de repensar o planejamento urbano para garantir o acesso equitativo aos serviços

básicos, espaços públicos de qualidade e uma distribuição mais equitativa dos recursos urbanos, além de uma adequada e igualitária proteção a sinistros como desastres naturais.

2.5 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As mudanças climáticas representam um dos mais significativos desafios enfrentados pela humanidade no século XXI. O aumento das emissões de gases de efeito estufa devido à queima de combustíveis fósseis têm desencadeado consequências que afetam diretamente o meio ambiente e a sociedade global. A concentração atmosférica de gases como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) acumulam calor na atmosfera, contribuindo para o fenômeno do aquecimento global e para a perturbação dos padrões climáticos em escala planetária. Na Figura 5 é possível observar como a concentração de gases de efeito estufa (GEE) se acumularam na atmosfera de forma exponencial no período de 1850 a 2019.

Figura 5 – Aumento das concentrações de GEE na atmosfera de 1850 a 2019.

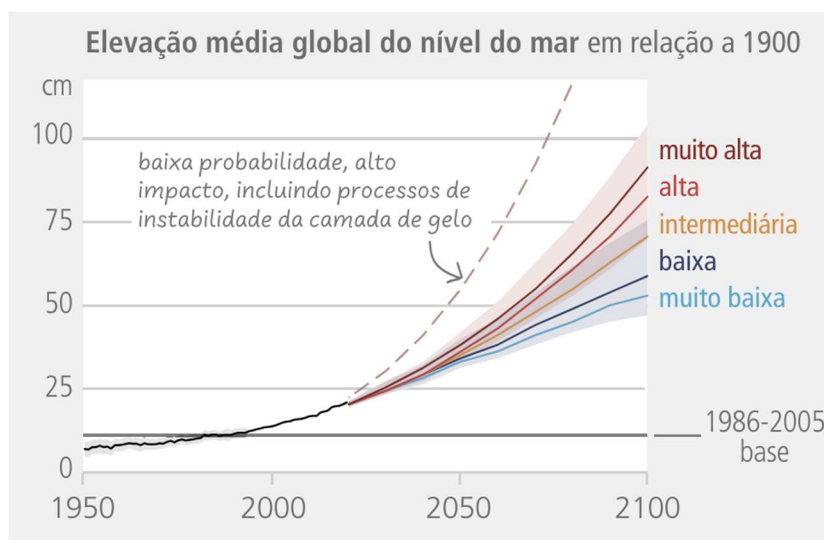


Fonte: Relatório Síntese Mudança do Clima, IPCC (2023).

O aumento das temperaturas globais está intensificando a frequência e a gravidade de eventos climáticos extremos, incluindo furacões, incêndios florestais, inundações e secas prolongadas. Observa-se também o derretimento das calotas polares e das geleiras, que combinadas a expansão térmica dos oceanos, vêm contribuindo para um aumento gradual no nível médio do mar (NMM). Projeções do IPCC sugerem que o nível do mar poderá subir entre 0,30 e 1 metro até o final do século, dependendo das trajetórias futuras de emissões de gases de

efeito estufa. A Figura 6 demonstra as projeções do IPCC para o aumento do NMM até o ano de 2100.

Figura 6 – Projeções para o aumento do NMM em centímetros até o ano de 2100 associadas a quantidade de emissão de GEE (muito alta, alta, intermediária, baixa, muito baixa).



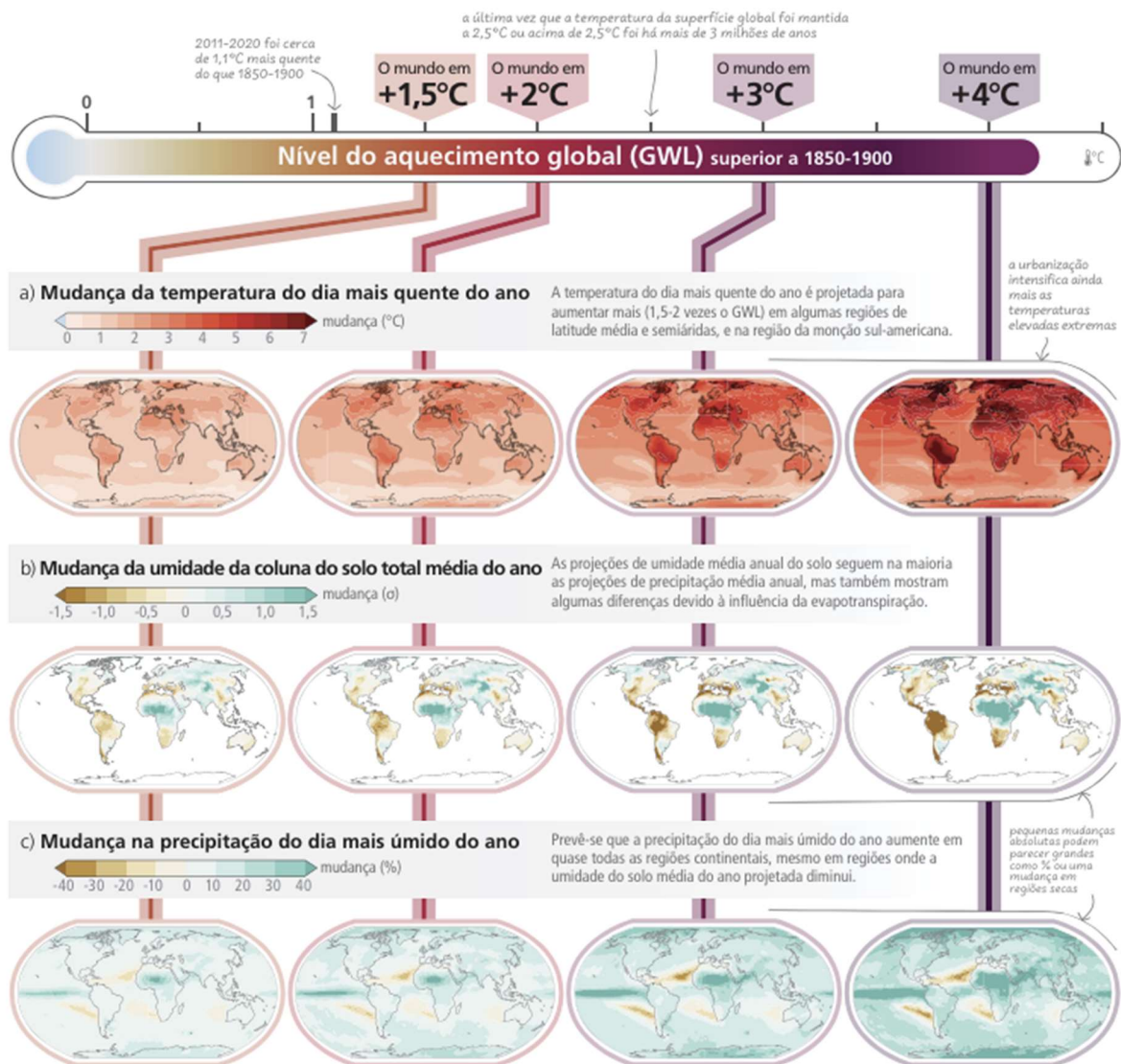
Fonte: Relatório Síntese Mudança do Clima, IPCC (2023).

As mudanças climáticas exercem grandes impactos no ciclo da água e nos padrões de extremos de precipitação e, portanto, pode afetar diretamente o escoamento superficial e a frequência e magnitude das inundações (KARAMOUZ *et al.*, 2011; MAHMOUD e GAN, 2018; YAZDANFAR e SHARMA, 2015). Países vulneráveis enfrentam inundações recorrentes que deslocam milhões de pessoas anualmente. Em áreas costeiras a situação é agravada pelo aumento do NMM e por padrões climáticos imprevisíveis. Há também uma preocupação crescente de que o risco de inundações aumente nas áreas metropolitanas em várias regiões do mundo, onde há grande concentração de população e de riquezas (HUONG e PATHIRANA, 2013; JIANG *et al.*, 2018; MAHMOOD *et al.*, 2017; ZHOU *et al.*, 2018).

A partir do aquecimento global, as mudanças regionais no clima se tornarão mais generalizadas e acentuadas. O relatório mais recente do IPCC (AR6) apresentou uma faixa de incerteza sobre as mudanças futuras avaliadas na temperatura da superfície global mais estreita do que no relatório de 2014 (AR5). Pela primeira vez em um ciclo de avaliação do IPCC, projeções de modelos múltiplos da temperatura da superfície global, do aquecimento dos oceanos e do nível do mar são limitadas utilizando observações e a avaliação da sensibilidade climática. A faixa provável de sensibilidade climática de equilíbrio foi reduzida para o intervalo 2,5°C–4,0°C, com uma melhor estimativa de 3,0°C. Para cenários projetados a longo prazo, isso leva a faixas de incerteza mais estreitas do que no AR5 (IPCC, 2023). Na Figura 7 é possível

visualizar os impactos globais de mudança de temperatura no dia mais quente do ano, mudança média anual da umidade da coluna do solo, e mudança na precipitação do dia mais úmido do ano associados aos aumentos dos níveis de aquecimento global a cenários de aumento de 1,5 °C, 2,0 °C, 3,0 °C e 4,0°C em relação ao período 1850-1900.

Figura 7 – Mudanças projetadas de temperatura diária máxima do ano, umidade da coluna do solo total média do ano CMIP e precipitação diária máxima do ano a níveis de aquecimento global de 1,5°C, 2°C, 3°C, e 4°C em relação a 1850–1900. Mudança de temperatura máxima do ano (°C) simulado (a), (b) umidade da coluna do solo média do ano (desvio padrão), (c) mudança de precipitação diária máxima do ano (%). As mudanças correspondem às mudanças medianas do multimodelo da CMIP6. Nos painéis (b) e (c), grandes mudanças relativas positivas em regiões secas podem corresponder a pequenas mudanças absolutas. No painel (b), a unidade é o desvio padrão da variabilidade interanual da umidade do solo durante 1850–1900. O desvio padrão é uma métrica amplamente utilizada para caracterizar a gravidade da seca. Uma redução projetada na umidade do solo média por um desvio padrão corresponde às condições de umidade do solo típicas das secas que ocorreram aproximadamente uma vez a cada seis anos durante 1850–1900.



Fonte: Relatório Síntese Mudança do Clima, IPCC (2023).

Para o aumento da precipitação, observa-se que a partir do aumento do aquecimento global, cada região é projetada para sentir cada vez mais mudanças simultâneas e múltiplas em agentes climáticos causadores de impacto. Aumentos de agentes climáticos causadores de impacto de calor e reduções nos causadores de frio são projetados em todas as regiões. A 1,5°C de aquecimento global, prevê-se que as precipitações fortes e as enchentes se intensifiquem e se tornem mais frequentes na maioria das regiões da África, Ásia, América do Norte e Europa. A 2°C ou acima, estas mudanças se expandem para mais regiões, se tornam mais significativas e são projetadas secas mais frequentes e severas na Europa, África, Australásia e América do Norte, Central e do Sul. Outras mudanças regionais previstas incluem a intensificação de ciclones tropicais e tempestades extratropicais e aumento da aridez e dos riscos de incêndio. Ondas de calor e secas compostas tornar-se-ão provavelmente mais frequentes, inclusive concomitantemente em múltiplos lugares.

A partir das projeções de intensificação da precipitação, espera-se que a ocorrência de chuvas mais intensas tenderá a agravar o funcionamento da rede de drenagem, com a produção de vazões maiores do que as projetadas, e a elevação do nível do mar aumentará a criticidade deste cenário, pois gera restrições na descarga do sistema, limitando sua capacidade e criando condições de remanso e alagamentos para montante. O incremento dos volumes pluviométricos afeta também as redes de abastecimento de água e de esgotamento sanitário. O impacto no sistema de abastecimento de água pode de se dar tanto pela escassez quanto pelo excesso de chuvas. Já a elevação do NMM poderá trazer danos diretos às áreas urbanizadas litorâneas, nas quais destacam-se àqueles relacionados a eventuais transtornos ocasionados por ressacas marítimas, que tendem a alcançar níveis cada vez maiores.

A complexidade dos sistemas urbanos e a incerteza sobre o impacto das mudanças climáticas afetam a maneira como entender e gerir os riscos futuros. As variantes climáticas introduzem estressores nesse processo com a intensificação dos eventos extremos. Dessa forma, o mapeamento das incertezas trazidas pelos cenários de mudanças climáticas para cenários futuros prováveis, pode ser uma ferramenta útil e necessária para o planejamento urbano (BRANDT *et al.*, 2021). O mapeamento das áreas afetadas pelas mudanças climáticas permite gerenciar adequadamente os riscos das cidades e prepará-las para responder de forma apropriada (AVAND *et al.*, 2021).

Ainda de acordo com o AR6, os principais riscos destacados para as regiões da América Central e América do Sul são: riscos associados à segurança hídrica; efeitos graves sobre a

saúde devido ao aumento de epidemias - em particular as doenças transmitidas por vetores; degradação dos ecossistemas dos recifes de corais devido ao embranquecimento de corais; risco à segurança alimentar devido a secas frequentes e extremas; danos à vida e infraestrutura devido a inundações, deslizamentos de terra, elevação do NMM, tempestades e erosão costeira (IPCC, 2023).

No Rio de Janeiro, é possível prever alguns desses riscos, sobretudo os riscos associados à segurança hídrica e danos à vida e infraestrutura, considerando as fragilidades do sistema urbano atual. Em relação ao saneamento é possível considerar a interação das redes pluviais e de esgoto como um indutor de risco. Além disso, remansos provocados pelo aumento do NMM poderão gerar refluxos de esgotos em domicílios, pressões internas elevadas nos coletores, trabalho excessivo das estações elevatórias, sobrecarga hidráulica das estações de tratamento de esgoto, além do comprometimento dos processos biológicos de tratamento de esgoto pela salinização. Há ainda problemas em relação à infiltração da água subterrânea salinizada nas redes de água, pela intermitência do abastecimento, e nas redes de esgoto. O aumento da influência da maré também gera prolongamento dos remansos fluviais que podem ser potencializados pela baixa declividade dos terrenos das baixadas (CONSÓRCIO QUANTALERNER, 2016).

O desastre socioambiental que ocorreu recentemente, em 2024, no estado brasileiro Rio Grande do Sul é um exemplo concreto de como a interação das redes de saneamento pode ser um fator agravante ao grau de risco. Neste evento, a falha do sistema de drenagem desencadeou uma crise de abastecimento hídrico e, concomitantemente, a interação dos resíduos sólidos e águas de esgoto com o sistema de drenagem – que neste momento já estava integrado a paisagem urbana – aumentaram a exposição da população a doenças de veiculação hídrica, além de provocar perdas substanciais de infraestruturas e bens. Além disso, durante dias contínuos houve o comprometimento, e em alguns casos até mesmo a interrupção, do funcionamento das redes que compõem o saneamento básico, impedindo que as cidades retornassem a normalidade.

Diante das ameaças existenciais consequentes das mudanças do clima, torna-se inadiável a tomada de ações imediatas e coordenadas em escala global. Atualmente, observa-se um amplo debate da sociedade científica sobre como mitigar os efeitos das mudanças climáticas e como tornar as populações urbanas menos expostas aos riscos gerados pela ocorrência de eventos naturais críticos. Essa condição de risco resultante dos impactos das

mudanças do clima e da urbanização pode ser reduzida pela capacidade do sistema-cidade de se adaptar, ou seja, de tornar-se resiliente. Nesse sentido, as evidências científicas destacam a urgência de reduzir drasticamente as emissões de GEE e implementar medidas de adaptação resilientes para mitigar os impactos adversos das mudanças climáticas.

2.6 OS DESASTRES SOCIONATURAIS

Os desastres socionaturais têm sido uma preocupação global crescente à medida que os eventos extremos se tornam mais frequentes e intensos, representando uma ameaça crescente para as comunidades em todo o mundo, impactando vidas, economias e ecossistemas. Uma compreensão abrangente das estatísticas mundiais desses eventos catastróficos é essencial para orientar políticas de mitigação de riscos e estratégias de resposta.

As estatísticas globais revelam uma tendência preocupante de aumento na frequência e na intensidade de desastres socionaturais nas últimas décadas (IPCC, 2019). De acordo com o Relatório Especial do IPCC sobre os Oceanos e a Criosfera em um Clima em Mudança (2019), o aumento das temperaturas globais está contribuindo para o aumento do nível do mar, o derretimento das geleiras e eventos climáticos mais extremos, como tempestades e inundações, fazendo um alerta sobre a necessidade urgente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e de aumentar a resiliência das comunidades ao redor do globo.

Segundo dados da ONU, entre 2000 e 2019, os desastres socionaturais afetaram mais de 4 bilhões de pessoas em todo o mundo, resultando em mais de 1,23 milhão de mortes e perdas econômicas estimadas em cerca de US\$ 2,97 trilhões. Esses números destacam a urgência de ações coordenadas para reduzir o risco de desastres e fortalecer a capacidade de resposta e recuperação das comunidades afetadas.

No contexto brasileiro, os desastres socionaturais têm sido uma preocupação crescente, afetando diversas regiões do país. De acordo com dados do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), entre 2000 e 2023, o Brasil registrou mais de 14 mil desastres socionaturais, incluindo inundações, deslizamentos de terra, secas e incêndios florestais. Esses eventos resultaram em milhares de mortes e afetaram milhões de pessoas em todo o país.

As regiões mais vulneráveis a desastres socionaturais no Brasil incluem o Nordeste, que enfrenta secas recorrentes, e a região Sudeste, propensa a inundações e deslizamentos de terra.

A urbanização desordenada, o desmatamento e a ocupação de áreas de risco aumentam a vulnerabilidade das comunidades a esses eventos, destacando a importância da gestão integrada de riscos e do planejamento urbano sustentável. Além disso, eventos extremos de chuva, em bacias hidrográficas altamente modificadas pelo processo de urbanização, aumentam as inundações urbanas devido principalmente às superfícies impermeáveis, aumentando a vazão de pico dos escoamentos.

Diante do aumento dos desastres socionaturais, é fundamental adotar abordagens integradas e baseadas em evidências para mitigar os riscos e proteger as comunidades vulneráveis. O Programa das Nações Unidas para os Assentamentos Humanos (ONU-Habitat) destaca a importância de políticas e práticas de planejamento urbano que promovam a resiliência e a sustentabilidade das cidades, considerando os impactos das mudanças climáticas e o crescimento populacional. Investimentos em infraestrutura resiliente, sistemas de alerta precoce e capacitação comunitária são essenciais para reduzir o impacto dos desastres socionaturais e garantir uma resposta eficaz e inclusiva. Além disso, a cooperação internacional e a troca de conhecimentos e melhores práticas são fundamentais para enfrentar os desafios globais associados aos desastres socionaturais.

Entre esses desastres, as inundações se configuram como uma das ameaças mais recorrentes e devastadoras em todo o mundo. As inundações são eventos complexos, resultantes da interação de múltiplos fatores, incluindo condições climáticas, topografia, uso do solo e infraestrutura urbana. O aumento das temperaturas globais e as mudanças nos padrões de precipitação, atribuídos às mudanças climáticas, têm contribuído para o agravamento dos riscos de inundações em muitas partes do mundo. A compreensão dos padrões de inundações, seus impactos e as medidas de adaptação e mitigação é essencial para enfrentar esse desafio crescente.

De acordo com o IPCC (2021) as mudanças climáticas estão exacerbando a frequência e a intensidade das inundações em muitas partes do mundo. O aumento das temperaturas globais está alterando os padrões de precipitação, levando a chuvas mais intensas e prolongadas, aumentando o risco de inundações em áreas urbanas e rurais. De acordo com dados da Organização das Nações Unidas (ONU), as inundações afetam milhões de pessoas todos os anos e representam uma das principais causas de deslocamento humano em muitas regiões (ONU, 2020). A urbanização rápida e o desenvolvimento inadequado de infraestrutura tornam

as áreas urbanas especialmente vulneráveis a inundações, resultando em perdas econômicas e sociais significativas.

O fato de o Brasil estar localizado em uma placa tectônica estável faz com que o país esteja salvo de eventos geofísicos como terremotos, tsunamis e eventos de atividade vulcânica, porém o número de ocorrência de fenômenos de caráter hidrológico é extremamente significativo. No Brasil, a ocorrência de desastres socionaturais está associada, em sua maior parte, à ocorrência de eventos deflagrados pela chuva, com destaque para as inundações e os deslizamentos de terra em áreas urbanas, onde a ação antrópica tende a agravar os efeitos destes eventos. Há também os impactos causados pelo efeito contrário, não de excesso, mas de escassez de água, que é o caso das estiagens, ou secas prolongadas. Esses eventos acometem principalmente a região Nordeste do país, mas não se limita a esta. As regiões que sofrem recorrentemente com os desastres associados a inundações e escorregamentos de massa, muitas vezes passam por longos períodos de estiagem, que comprometem o abastecimento hídrico e energético gerando consequências sanitárias e econômicas de grandes proporções. Recentemente, nos anos de 2014 e 2015, a região Sudeste do Brasil viveu uma das maiores crises hídricas da história, com risco real de desabastecimento da Região Metropolitana de São Paulo. Essa crise mostrou a fragilidade do sistema e a necessidade de encontrar alternativas que aumentem a disponibilidade hídrica, bem como a necessidade de gerir o sistema de forma mais eficaz.

As inundações são desastres que afetam negativamente os sistemas socioeconômicos, causando danos e perdas significativos (NOFAL e VAN DE LINDT, 2022). Embora variando muito em magnitude e dependendo de vários fatores específicos do local, as inundações afetaram mais de 1,65 bilhão de pessoas entre 2000 e 2019, representando cerca de 44% de todos os desastres socionaturais registrados durante esse período (CRED e UNDRR, 2020).

Mundialmente, as inundações são os desastres socionaturais responsáveis pela maior perda de vidas e bens ao longo da história. Estatísticas mostram que as cheias são o fenômeno natural que mais causa danos e perdas ao redor do mundo, representando cerca de 60% das perdas de vidas humanas e 30% das perdas econômicas causadas por desastres socionaturais (MIGUEZ *et al.*, 2016).

2.7 OS DESASTRES SOCIONATURAIS E O CONTEXTO HABITACIONAL NO BRASIL

O mundo vem passando por mudanças que não se limitam aos aspectos climáticos. Paralelos aos processos de mudanças climáticas, vêm-se acelerando a globalização (aumentando a conectividade de pessoas, mercadorias e informação), e a precarização de sistemas de governo (reduzindo investimentos em saúde, aumentando a dependência de mercados e aumentando as desigualdades sociais) (BARCELLOS *et al.*, 2009).

Os riscos associados às mudanças climáticas globais não podem ser avaliados em separado desse contexto: pelo contrário, deve-se ressaltar que os riscos são o produto de perigos e vulnerabilidades. Os perigos no caso das mudanças climáticas, são dados pelo incremento da magnitude de eventos extremos, já as vulnerabilidades são conformadas pelas condições sociais do sistema afetado, marcadas pelas desigualdades, as diferentes capacidades de adaptação, resistência e resiliência. Nesse contexto, as mudanças no cenário climático mundial, junto ao aumento exponencial da população, contribuem para o aumento da condição de risco.

No caso de países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, a exposição física ao risco é agravada pela sua pobreza estrutural na produção do espaço, em que são formados novos territórios inseguros: essa insegurança remete à natureza dinâmica das superfícies inconstantes sobre as quais esses territórios se formam. A pobreza se transforma, assim, em um fator de multiplicação de riscos e de seus efeitos adversos. Levando-se em consideração a gestão integrada do risco (MIGUEZ *et al.*, 2018), fica evidente que as populações pobres são as que possuem menos recursos para prevenir, mitigar, monitorar, responder e se recuperar dos impactos dos desastres, sejam eles de qualquer natureza, caracterizando uma latente falta de resiliência. Nesse sentido, é importante destacar que as populações pobres enfrentam dificuldades adicionais na recuperação após um desastre. A falta de recursos financeiros e de apoio governamental adequado dificulta o retorno à normalidade. Além disso, essas comunidades muitas vezes enfrentam discriminação e negligência por parte das autoridades, o que agrava ainda mais sua situação.

No Brasil, os desastres têm sido uma realidade que assola as populações mais pobres e vulneráveis. Esses eventos, que incluem inundações, deslizamentos de terra, secas, têm consequências significativas nas vidas e nos meios de subsistência das pessoas, especialmente daquelas que vivem em condições precárias de habitação. Estudos recentes destacam a importância de abordar as disparidades socioeconômicas na gestão de riscos de inundação, visando proteger os grupos marginalizados. A falta de acesso a recursos e infraestrutura

adequada aumenta a vulnerabilidade dessas comunidades aos impactos das inundações, resultando em ciclos persistentes de pobreza e marginalização.

Hoje, o Brasil enfrenta uma grave crise habitacional, refletida no déficit habitacional existente no país. De acordo com dados do IBGE, milhões de famílias vivem em condições precárias de moradia, seja em habitações improvisadas, em áreas de risco ou em situação de vulnerabilidade socioeconômica. Essas condições tornam essas populações ainda mais suscetíveis aos impactos dos desastres naturais. Nesse contexto, os desastres exacerbam as desigualdades sociais e econômicas, atingindo de forma desproporcional as populações mais pobres. Em áreas urbanas, onde o déficit habitacional é mais evidente, as inundações e deslizamentos causadas por fortes chuvas podem destruir construções precárias e forçar famílias a se deslocarem para abrigos improvisados. No meio rural, as estiagens têm grandes impactos nas comunidades mais pobres, que dependem da agricultura de subsistência para sua sobrevivência. A falta de acesso a recursos hídricos adequados e infraestrutura básica de apoio torna essas comunidades ainda mais vulneráveis.

A forma como a urbanização se dá no espaço está diretamente ligada a propensão a ocorrência de inundações urbanas. O grande desenvolvimento urbano no Brasil ocorreu no final dos anos 1960 até o final dos anos 1990, quando o país passou de 55 % de população urbana para 76% (FGV, 1998 apud TUCCI, 2003). Esta concentração de população ocorreu principalmente em grandes metrópoles ocasionando o aumento da frequência das inundações em função da impermeabilização do solo. Nos últimos anos, o aumento da população urbana ocorre principalmente na periferia das metrópoles, ocupando áreas de risco de inundação e de escorregamento de terra (TUCCI, 2003).

As grandes taxas de urbanização que vem ocorrendo, trazem junto a si problemas diversos de ocupação do solo urbano. Esta ocupação, nem sempre ordenada ou planejada, costuma interferir diretamente na mudança dos padrões de escoamento natural e iniciar o processo de ocorrência de inundações urbanas. Nesse contexto, na maioria das vezes, a ocupação urbana ocorre sem que haja o consequente acompanhamento necessário da infraestrutura que deveria estar associada a esta ocupação, ou seja, condições mínimas de saneamento geral não costumam ser atendidas, fato que gera importantes reflexos sobre as comunidades que ocupam as áreas alagáveis (MIGUEZ, 2001).

No Brasil, enchentes e deslizamentos representam os principais eventos relacionados a desastres naturais, porém, não podemos ignorar o fato de que na maioria dos casos as ocupações afetadas encontravam-se em áreas naturalmente alagáveis ou sujeitas a movimentos de massa. Isso se deve, principalmente, ao crescimento urbano desordenado (VASCONCELLOS, 2011). Devido à falta de um planejamento urbano eficiente, o aumento populacional nas grandes metrópoles geralmente teve como consequência direta a ampliação das ocupações de áreas impróprias para construção. Nesse contexto, as vulnerabilidades sociais e construtivas multiplicam-se aos perigos ambientais equacionando nas áreas de risco.

A análise de dados estatísticos pode levar à ideia de que a formação de áreas de risco está intrinsicamente ligada ao déficit habitacional no Brasil. Atualmente, o método de cálculo e dos indicadores habitacionais adotado pelo Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MDR) é resultado de uma parceria entre o MDR e a Fundação João Pinheiro (FJP), que foi elaborado após um amplo debate com a participação de instituições acadêmicas nacionais e internacionais. O objetivo é que a análise dos dados se adaptasse às mudanças nas pesquisas realizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), com destaque para a Pesquisa Nacional de Domicílios Contínua (PnadC). Portanto, com a mudança no método de apuração e consolidação dos dados, não é possível realizar comparações do banco de dados apresentados para o período de 2016-2019 com os de períodos anteriores. Os novos cálculos trazem uma série de inovações que ajudam a aproximar os indicadores da complexa realidade habitacional do Brasil.

Segundo dados calculados pela FJP, cujos indicadores são adotados pelo governo federal desde 1995, em 2019 o Brasil registrou um déficit habitacional de 5,876 milhões de moradias. Esse indicador inclui domicílios precários, em coabitação e domicílios com elevado custo de aluguel. De acordo com essa pesquisa, esse número de moradias representa 8% dos domicílios do país. O alto valor do aluguel urbano responde por mais de metade do déficit habitacional total – um total de 3.035.739 de moradias. Um dos destaques desse levantamento é o impacto do alto custo dos aluguéis urbanos. Essa categoria do déficit passou de 2,814 milhões em 2016 para 3,035 milhões em 2019, respondendo por 52% do total do indicador. Entram nesse indicador as moradias cujo custo de aluguel responde por mais de 30% da renda familiar. Já a quantidade de residências que apresentam algum tipo de inadequação chega a mais de 24,8 milhões – esta foi a primeira vez que esse dado foi consolidado na pesquisa. O indicador inclui características de infraestrutura urbana, como falta de abastecimento de água, de esgotamento sanitário, de energia elétrica e de coleta. Além de inadequações edilícias, como

a falta de espaço de armazenamento, ausência de banheiro, cobertura inadequada e piso inadequado, entre outros. A Tabela 1 é mostra o total relativo da população sem habitação em porcentagem para cada região, estado e regiões metropolitanas.

Tabela 1 – Déficit Habitacional Total por situação de domicílio e Déficit Habitacional Relativo – Brasil, grandes regiões, UF e regiões metropolitanas (2019).

Especificação	Déficit Habitacional			
	Total	Urbano	Rural	Total Relativo (%)
Região Norte	719.638	522.599	197.039	12,9
Rondônia	60.347	48.689	11.658	9,7
Acre	23.285	18.741	4.544	8,6
Amazonas	168.603	133.493	35.110	14,8
<i>RM Manaus</i>	100.239	90.993	9.245	13,0
Roraima	23.844	19.234	4.610	15,2
Pará	354.296	229.536	124.761	13,5
<i>RM Belém</i>	79.490	78.300	1.190	11,1
Amapá	41.973	37.684	4.289	17,8
<i>RM Macapá</i>	31.263	29.816	1.447	18,3
Tocantins	47.290	35.222	12.068	8,9
Região Nordeste	1.778.964	1.318.326	460.639	9,2
Maranhão	329.495	164.486	165.008	15,2
<i>RM Grande São Luis</i>	43.883	40.198	3.685	9,9
Piauí	115.190	64.701	50.489	10,7
<i>RIDE Grande Teresina</i>	35.538	22.197	13.341	9,1
Ceará	239.187	200.367	38.820	8,0
<i>RM Fortaleza</i>	107.230	103.269	3.961	8,1
Rio Grande do Norte	93.788	74.463	19.325	8,0
<i>RM Natal</i>	35.407	31.885	3.522	6,8
Paraíba	132.383	111.601	20.782	9,8
<i>RM João Pessoa</i>	46.937	42.487	4.450	10,5
Pernambuco	246.898	224.909	21.989	7,5
<i>RM Recife</i>	113.275	111.902	1.373	8,0
Alagoas	126.594	105.439	21.154	11,0
<i>RM Maceió</i>	63.122	62.878	244	13,0
Sergipe	81.321	65.971	15.351	10,0
<i>RM Aracaju</i>	36.334	35.564	770	10,8
Bahia	414.109	306.389	107.720	7,8
<i>RM Salvador</i>	109.708	107.068	2.640	7,3
Região Sudeste	2.287.121	2.202.023	85.098	7,2
Minas Gerais	496.484	454.836	41.649	6,6
<i>RM Belo Horizonte</i>	107.044	106.221	823	5,6
Espírito Santo	83.323	79.910	3.413	5,8
<i>RM Grande Vitória</i>	39.079	39.045	34	5,6
Rio de Janeiro	481.243	469.316	11.927	7,3
<i>RM Rio de Janeiro</i>	361.619	355.130	6.489	7,5
São Paulo	1.226.071	1.197.961	28.109	7,6
<i>RM São Paulo</i>	590.706	579.294	11.411	7,7
Região Sul	618.873	571.291	47.582	5,6
Paraná	247.153	230.055	17.098	6,1
<i>RM Curitiba</i>	84.104	80.028	4.076	6,5
Santa Catarina	150.793	139.546	11.247	5,9
<i>RM Florianópolis</i>	31.914	31.105	809	7,9
Rio Grande do Sul	220.927	201.690	19.237	5,1
<i>RM Porto Alegre</i>	90.585	88.528	2.057	5,4
Região Centro-Oeste	472.102	430.084	42.018	8,4
Mato Grosso do Sul	71.966	66.830	5.136	7,7
Mato Grosso	101.158	85.815	15.343	8,7
<i>RM Vale do Rio Cuiabá</i>	31.693	30.073	1.620	10,3
Goiás	209.424	192.869	16.555	8,4
<i>RM Goiânia</i>	67.894	67.693	201	7,4
Distrito Federal	89.554	84.570	4.984	8,9
BRASIL	5.876.699	5.044.322	832.377	8,0
<i>Total das RMs</i>	2.207.062	2.133.673	73.389	7,8
<i>Demais áreas</i>	3.669.637	2.910.650	758.987	8,2

Fonte: Fundação João Pinheiro (FJP). Dados básicos: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2016-2019. Obs: Déficit Habitacional Relativo aos domicílios particulares permanentes e improvisados.

Com falta de moradias, a população de baixa renda busca alternativas em áreas que não deveriam ser habitadas, esquecidas pelo mercado imobiliário, o que historicamente tornou incontável o processo de ocupação dos morros e terrenos baixos e alagáveis (ABREU, 2008). Esse cenário não é arbitrário, a segregação socioespacial é legitimada muitas vezes pelo Estado a fim de atender aos interesses do capital imobiliário. Tratar o problema como uma manifestação individual nos leva a ver o desastre como um evento isolado, o que nos impede de entender a complexidade da violência do Estado - os governos inclusive jogam politicamente com essa crença para se eximirem da responsabilidade pelas consequências das políticas conduzidas por eles.

Ao contrário de se enfatizar apenas a perspectiva física e natural, o desastre deve ser encarado também como problema social. Partindo da premissa de que, se a estrutura atual das cidades se caracteriza pela tendência a um modelo dicotômico do tipo núcleo-periferia - onde a cidade dos ricos se contrapõe a cidade dos pobres -, em que, principalmente as periferias se assentam sobre áreas sujeitas a perigos, formando assim as áreas de risco, isto não se deve apenas às forças do mercado.

Os deslizamentos e inundações fazem parte da dinâmica natural dos ecossistemas e só se configuram como ameaças na presença de vidas humanas, portanto, são considerados setores ou áreas de risco apenas aqueles com pessoas ou edificações vulneráveis. Em outras palavras, se o fenômeno natural não traz impactos sociais relevantes, não se pode falar em risco. O risco, portanto, na maioria dos casos, não é uma condição pré-estabelecida, mas uma construção político-social. Diante disso, é importante ressaltar que os desastres são socionaturais, e não naturais.

Nesse sentido, fica evidente que os riscos e desastres associados a deslizamentos de terra e inundações, não possuem solução estritamente técnica. Para superarmos, ou ainda, reduzirmos esse problema, devemos pensar de forma integrada: soluções de engenharia, planejamento urbano e políticas públicas devem ser pensadas em conjunto de forma a alcançar a gestão integral do risco. Por exemplo, quando se tem uma dada população em risco, são realizadas obras civis para que esse risco seja erradicado, ou pelo menos, mitigado. Quando uma população se assenta sobre uma área relativamente segura, mas essa segurança pode ser comprometida pela expansão dessa ocupação, é imprescindível que haja políticas de controle de ocupação do solo, além de um planejamento que preveja a expansão urbana para áreas adequadas. Ainda, em outros casos, é possível planejar a relocação de edificações em áreas

ambientalmente vulneráveis. Portanto, as soluções de engenharia são de caráter reparatório, enquanto o planejamento urbano é uma forma de evitar que territórios formem novas áreas de risco.

Diante desse cenário, torna-se evidente a urgência de políticas públicas eficazes para enfrentar tanto o déficit habitacional quanto os desafios relacionados aos desastres socionaturais. Investimentos em infraestrutura resiliente, programas de reassentamento seguro e medidas de adaptação às mudanças climáticas são essenciais para proteger as populações mais vulneráveis e reduzir sua exposição aos riscos. Por fim, os desastres socionaturais representam uma ameaça significativa para as populações mais pobres e vulneráveis no Brasil, agravando ainda mais o já preocupante déficit habitacional do país, sendo fundamental que sejam adotadas medidas urgentes para enfrentar esses desafios e garantir que todas as pessoas tenham acesso a condições de moradia dignas e seguras.

2.8 MEDIDAS DE CONTROLE ESTRUTURAIS E NÃO ESTRUTURAIS

Durante a primeira parte do século XX, o conceito de gerenciamento de risco de inundação começou a emergir e, em particular, o reconhecimento de que a gestão de inundações não era apenas uma atividade de engenharia, mas também uma atividade social. Ao longo dos anos 1960 a 1980, o principal meio de mitigar os impactos das inundações continuou sendo o controle físico (por meio da construção de diques, canais, represas e outras estruturas de drenagem). A partir do conhecimento obtido ao longo do tempo, é possível afirmar que estruturas de mitigação de inundações mais resilientes e adaptáveis são capazes de responder melhor às incertezas futuras (LI *et al.*, 2019; SINGH *et al.*, 2022).

A valorização econômica do solo urbano quando desatrelada de uma política habitacional adequada favorece assentamentos urbanos informais, levando à ocupação de áreas de risco e a conformação de favelas. À medida que as populações cresceram e as planícies de inundação foram sendo ocupadas, as perdas por inundações aumentaram exponencialmente, e as inundações passaram a exceder a capacidade que as obras de engenharia tinham sido projetadas para resistir. Com isso, tornou-se evidente a necessidade de usar uma nova estratégia de gestão de risco que não se limitasse a obras estruturais, mas que levasse em conta a capacidade de reação da população atingida para minimizar sua vulnerabilidade através do aumento de sua capacidade de resposta (SAYERS *et al.*, 2013; MIGUEZ *et al.*, 2018). Na Figura

8 é possível ver como a relação entre as inundações e as cidades se deu ao longo do tempo, com destaque para a emergência da prática de medidas não-estruturais em drenagem urbana.

Figura 8 – Evolução da relação das cidades e inundações.



Fonte: Adaptado de SAYERS *et al.*, 2013.

De forma simplificada, Bertoni e Tucci (2003) afirmam que as medidas estruturais são aquelas que modificam o sistema fluvial evitando os prejuízos decorrentes das inundações, enquanto as medidas não estruturais são aquelas em que os prejuízos são reduzidos pela “melhor convivência da população com as enchentes”. Tradicionalmente, a solução do problema tinha o foco sobre a redução da probabilidade de ocorrência inundações por meio de extensos sistemas de defesa estrutural que controlasse as enchentes dos rios. Hoje, há cada vez mais o reconhecimento de que as ações não estruturais contribuem fortemente para a gestão de riscos. Através de medidas não estruturais é possível reduzir a exposição das pessoas, da economia, e dos ecossistemas aos riscos de inundações por meio do controle e do planejamento do uso do solo em áreas propensas a inundações. Além de reduzir a exposição, pode-se ainda reduzir a vulnerabilidade das pessoas expostas a inundações por meio do uso de sistemas de alerta, planos de contingência e monitoramento climático para previsão de chuvas.

A minimização de impactos causados pelas cheias depende tanto da conscientização da população que habita em áreas sujeitas às inundações, quanto do poder público, pois como o

controle de inundações é um processo contínuo, não basta que se estabeleçam regulamentos e que se construam obras de proteção, é também necessário que o poder público tenha controle efetivo sobre a expansão da ocupação do solo e estar atento as suas possíveis violações, evitando que novas áreas de risco se formem.

Nesse contexto, é necessário que haja um plano de emergência caso as infraestruturas de drenagem falhem, já que, por concepção, são projetadas para falharem em eventos excepcionais que excedam a sua capacidade. Além disso, é necessário que o poder público esteja comprometido em engajar a população ameaçada acerca de sua condição, aumentando sua autonomia e capacidade de resposta através do conhecimento dos planos de contingência, e atuando na prevenção de desastres socionaturais através da conscientização em relação a quais áreas são inadequadas para a construção.

2.1.1. Medidas estruturais

As medidas estruturais são medidas de controle de inundações que são essencialmente construtivas, como represas, reservatórios de retenção e detenção, canalizações de rios, barragens e todas os dispositivos que compõem a microdrenagem (levando-se em consideração a visão tradicional de manejo de águas fluviais); além de telhados verdes, reservatórios de lote, pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração e jardins de chuva (tendo como referência a abordagem sustentável em drenagem e as soluções baseadas na natureza) (HERZOG, 2013; MIGUEZ *et al.*, 2016). As medidas estruturais são, portanto, alterações ou intervenções físicas diretas nos elementos da drenagem urbana. O Quadro 2 mostra as principais medidas estruturais de drenagem, assim como suas principais vantagens, desvantagens e aplicações.

Essas estruturas, sobretudo as grandes obras dentro da lógica tradicional em drenagem urbana, podem gerar uma falsa sensação de segurança para a população e induzir ocupações em áreas que não deveriam ser habitadas. O que grande parte da população não sabe é que essas estruturas que são construídas para proteção da cidade, são também projetadas para falhar à critério da magnitude da chuva, e por esse motivo é necessário que medidas de prevenção, preparação e resposta sejam tomadas.

Quadro 2 – Medidas estruturais em drenagem urbana

Medida	Vantagem	Desvantagem	Aplicação
<i>Medidas extensivas:</i>			
Cobertura Vegetal	Redução do pico de cheia	Impraticável para grandes áreas	Pequenas Bacias
Controle de perda	Reduz assoreamento	Impraticável para grandes áreas	Pequenas Bacias
<i>Medidas intensivas:</i>			
Diques e pôlderes	Alto grau de proteção de uma área	Danos significativos caso falhe	Grandes Rios
<i>Melhoria do canal:</i>			
Redução da rugosidade por desobstrução	Aumento da vazão com pouco investimento	Efeito localizado	Pequenos rios
Corte de meandro	Amplia a área protegida e acelera o escoamento	Impacto negativo em rio com fundo aluvionar	Área de inundação estreita
<i>Reservatório:</i>			
Todos os reservatórios	Controle a jusante	Localização difícil	Bacias intermediárias
Reservatório com comportas	Mais eficientes com o mesmo volume	Vulnerável a erros humanos	Projetos de usos múltiplos
Reservatórios para cheias	Operação com mínimos de perdas	Custo não partilhado	Restrito ao controle de enchentes
<i>Mudança de canal:</i>			
Caminho da cheia	Amortecimento de volumes	Depende da topografia	Grandes bacias
Desvios	Reduz vazão do canal principal	Depende da topografia	Bacias médias e grandes

Fonte: Simons *et al.*, 1977.

2.1.2. Medidas não-estruturais

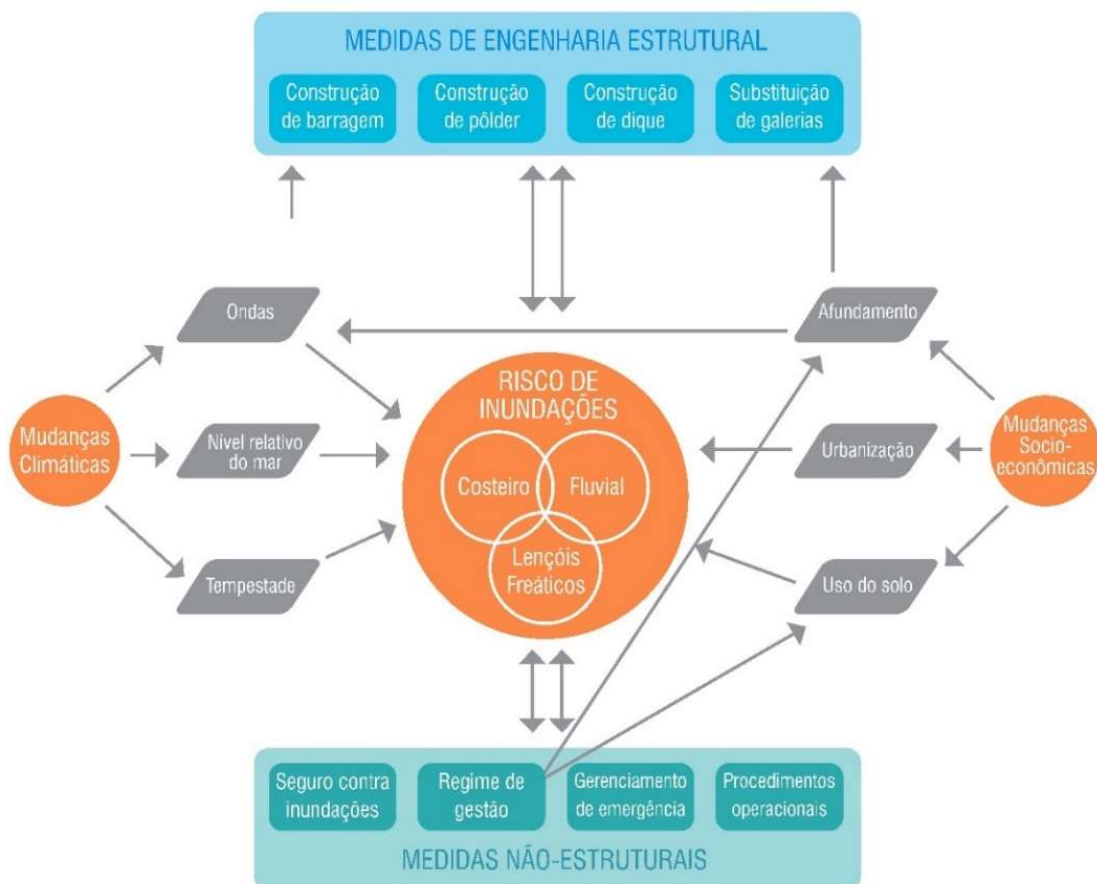
As medidas não-estruturais são as leis, regulamentos, decretos, operações, ações, planos, políticas e programas voltados a prevenção, preparação e resposta que buscam reduzir consequências das inundações. Nesse sentido, as medidas não-estruturais contribuem para a mitigação do risco não por meio de obras, mas pela introdução instrumentos de legislação que vise o controle do uso e ocupação do solo e a preservação da cobertura vegetal, o zoneamento das áreas de inundação, seguro-inundações, a implementação de sistemas de alerta e alarme, além de ações de educação ambiental que busquem a conscientização da população sobre a percepção do risco, sobre a responsabilidade de contribuição para a boa manutenção dos

dispositivos de drenagem e sobre como atuar na resposta a desastres. São exemplos de alguns instrumentos e ações que constituem medidas não estruturais:

- Plano Diretor de Drenagem Urbana para a regulamentação do manejo das águas pluviais;
- Plano Diretor voltado ao ordenamento e normatização do uso e ocupação do solo, evitando assim construções em locais inapropriados;
- Plano de Contingência de Defesa Civil, elaborado para orientar as ações de preparação e resposta a um determinado cenário de risco, caso o evento adverso venha a se concretizar;
- Operacionalização de barragens e reservatórios;
- Monitoramento e controle de dados em geral como precipitação, níveis dos rios e da maré, sistema de mobilidade urbana e sistema de comunicação local;

Na Figura 9 é possível observar um modelo conceitual inspirado em um caso real, de como as mudanças socioeconômicas e as mudanças climáticas influenciam o agravamento dos riscos de inundações e quais as medidas de controle estruturais e não estruturais utilizadas para contenção dos riscos para esse estudo de caso.

Figura 9 – Modelo conceitual da interação entre fatores climáticos e socioeconômicos que conduzem ao risco de inundações futuras de uma bacia específica.



Fonte: Adaptado de SAYERS, *et al.*, 2013.

Apesar das medidas estruturais associadas às medidas não-estruturais poderem ser aplicadas para a mitigação de inundações em bacias urbanizadas, as ações públicas, em muitas cidades brasileiras, estão equivocadamente voltadas quase que exclusivamente para execução de medidas estruturais. Isso se deve em virtude da crença de que medidas estruturais, por serem normalmente, obras de engenharia, e portando concretamente visíveis, proporcionam maior sensação de segurança para a população. Embora as obras de engenharia sejam necessárias em muitos casos, as ações de cunho social, econômico e administrativo também têm seu papel decisivo, através da educação, conscientização e organização por parte da sociedade civil e do poder público. É através de uma visão integrada da gestão de risco e do reconhecimento das limitações físicas e financeiras de um determinado lugar, que é possível traçar a melhor estratégia possível para a gestão do risco, propondo de forma equilibrada soluções de medidas estruturais e não estruturais.

Simons (1977) destaca que fazem parte do projeto de controle de inundações medidas estruturais e não-estruturais. Sendo assim, medidas de controle estruturais e não estruturais desempenham papéis essenciais na prevenção e mitigação de desastres naturais. Ao combinar abordagens físicas e abordagens baseadas em políticas, planejamento urbano e educação pública, é possível desenvolver estratégias holísticas e eficazes para proteger comunidades contra os efeitos prejudiciais de eventos extremos. É crucial que governos, organizações não governamentais e comunidades locais trabalhem em conjunto para implementar medidas de controle abrangentes que garantam a segurança e resiliência das populações vulneráveis em face dos desafios apresentados pelo clima. Essa nova abordagem sistêmica de gestão de risco, que considera as etapas anteriores, durante e após os desastres, conjugando medidas estruturais e não estruturais é conhecida como Gestão Integral de Riscos (MIGUEZ *et al.*, 2018).

2.9 “*FAIL-SAFE X SAFE-TO-FAIL*”: MUDANÇA DE PARADIGMA

A gestão eficaz dos sistemas de drenagem urbana é essencial para mitigar os impactos das precipitações pluviais e garantir a segurança das áreas urbanas. Tradicionalmente, os sistemas de drenagem foram projetados com base no paradigma *fail-safe*, visando evitar falhas de grandes proporções a todo custo (JONES *et al.*, 1975). No entanto, o crescente reconhecimento da complexidade dos sistemas urbanos e das incertezas associadas às mudanças climáticas tem impulsionado uma mudança de paradigma em direção ao conceito de *safe-to-*

fail (seguro para falhar). Essa transição paradigmática impulsionou uma mudança na gestão e no planejamento de sistemas de drenagem urbana.

Durante décadas, estratégias distintas de drenagem urbana foi desenvolvida e implementada como uma tentativa de controlar o potencial das enchentes de estressar os sistemas urbanos (FLETCHER, 2015; SHUSTER, 2005; HUNT *et al.*, 2015). No entanto, é comum ver que novas implementações e mais investimentos continuam a ser feitos sem realmente reverter a situação. As inundações continuam a ser um problema mesmo após a adoção de medidas de engenharia rígidas, como sistemas de drenagem subterrânea, bacias de retenção e canais artificiais (SAYERS, 2013; YUAN, 2024; GALLOWAY *et al.*, 2013), o que significa que, embora vários esforços estejam sendo realizados para mitigar as inundações, suas consequências continuam significativas e podem até aumentar com o tempo, seguindo as tendências de urbanização e aumento da população, que, por sua vez, expõem mais pessoas e bens às inundações. Esse padrão indica a falta de sustentabilidade dos sistemas de drenagem urbana.

A sustentabilidade do mundo do século XXI depende, em grande parte, da sustentabilidade das cidades. Inicialmente, a implementação da sustentabilidade estava diretamente associada a conceitos de estabilidade, prática de gerenciamento eficaz e controle de mudanças e crescimento - uma mentalidade à prova de falhas (“*fail-safe*”). Abordagens mais recentes sobre mudanças climáticas, incertezas e adaptabilidade foram fundamentais para o surgimento do conceito de resiliência, ligado a capacidade dos sistemas de se reorganizarem e se recuperarem de mudanças e distúrbios sem mudar sua conjuntura - em outras palavras, sistemas que são seguros para falhar (“*safe-to-fail*”) (AHERN, 2011).

O paradigma *fail-safe*, historicamente dominante na concepção de sistemas de drenagem urbana, é caracterizado pela busca da eliminação completa de falhas e pela ênfase na segurança absoluta (JONES *et al.*, 1975). Nesse modelo, os sistemas são projetados para resistir a eventos extremos de precipitação, com margens de segurança consideráveis para evitar inundações e danos à infraestrutura urbana. Sob o paradigma *fail-safe*, as estratégias de gestão de drenagem tendem a ser reativas, baseadas em previsões determinísticas de eventos climáticos e em medidas de controle rígidas. No entanto, essa abordagem enfrenta limitações significativas diante da crescente variabilidade climática e da incerteza associada às projeções futuras de precipitação.

Nesse contexto, a análise de desempenho da infraestrutura urbana era tradicionalmente feita por métodos clássicos de avaliação de risco, e veio sendo influenciado pela evolução das abordagens de gerenciamento de risco de inundação nas últimas duas décadas. Entretanto, os riscos estão em constante evolução e é por isso que as abordagens atuais podem não ser mais totalmente suficientes no futuro (GASSER *et al.*, 2019). A transição da lógica da proteção estrutural para uma estratégia baseada no risco, seguida de uma abordagem mais holística, foi impulsionada principalmente pelo conceito de resiliência, que vem ganhando cada vez mais espaço da literatura científica desde o início deste século (ZEVENBERGEN *et al.*, 2020). Nesse sentido, foram necessários esforços adicionais, além do estado da arte bem estabelecido, para garantir a recuperação eficiente de eventos perturbadores de baixa probabilidade e alto impacto (PANTELI e MANCARELLA, 2015).

Nesse contexto, a resiliência dos sistemas de infraestrutura tem recebido cada vez mais atenção em todo o mundo, sendo considerada uma propriedade essencial para lidar com interrupções, evitando efeitos em cascata e disseminando perdas no território (JACKSON, 2015). A resiliência está associada à capacidade de um sistema de absorver impactos e manter suas funções, ou seja, de sobreviver ou persistir em um ambiente com variações e incertezas ao longo do tempo. Dessa forma, o conceito de resiliência combina com os propósitos sustentáveis, uma vez que ambas as abordagens olham para o futuro tentando garantir sistemas funcionais e melhor qualidade de vida. A maneira como o sistema responde a um determinado desafio é o que determinará o grau de sua resiliência.

O projeto de drenagem é desenvolvido de modo que a infraestrutura garanta a segurança das pessoas, o funcionamento das atividades urbanas e a preservação de outras infraestruturas. Tradicionalmente, a infraestrutura de drenagem era projetada dentro da lógica de "*fail-safe*" oferecendo proteção robusta quando os riscos são previstos com precisão dentro de um fator de segurança projetado (KIM *et al.*, 2017). Esse fundamento de projetar as estruturas equivalentes a um fator de segurança elevado é utilizado até os dias de hoje para a maioria das obras da construção civil.

Seguindo a lógica de que as mudanças climáticas afetam os padrões de precipitação de forma a ocasionar chuvas mais intensas, é fato que a infraestrutura urbana se torna mais vulnerável às inundações. Nesse sentido, os riscos e as incertezas enfrentados pela infraestrutura urbana se tornam cada vez maiores devido às mudanças do clima, fazendo com que o paradigma à prova de falhas, da lógica "*fail-safe*" passasse a ser questionado. "*Safe-to-fail*" é um

paradigma emergente que descreve amplamente os cenários de adaptação que permitem que a infraestrutura falhe, mas controlam ou minimizam as consequências da falha (KIM *et al.*, 2017).

O reconhecimento das limitações do paradigma *fail-safe* tem impulsionado uma mudança de paradigma em direção ao conceito de *safe-to-fail*. Sob essa abordagem, os sistemas de drenagem são projetados e gerenciados com a compreensão de que falhas são inevitáveis e que a resiliência é alcançada não apenas evitando falhas, mas também aprendendo com elas. É necessário enfatizar que o paradigma *safe-to-fail* reconhece a necessidade de sistemas adaptativos e flexíveis, capazes de se ajustar às condições em constante mudança e de responder a eventos extremos de maneira resiliente (WALKER *et al.*, 2006). Isso envolve a integração de princípios de governança adaptativa, monitoramento contínuo e engajamento comunitário na gestão de sistemas de drenagem urbana. A transição de *fail-safe* para *safe-to-fail* tem amplas implicações na gestão e no planejamento de sistemas de drenagem urbana. Em vez de se concentrar exclusivamente na mitigação de riscos, os gestores agora devem adotar uma abordagem mais holística, considerando a resiliência do sistema como um todo (BROWN *et al.*, 2019).

Nesse contexto, as redes de infraestrutura de drenagem urbana com abordagens baseadas no risco tornaram-se insuficientes para gerenciar futuros eventos extremos de inundação. Tanto o sistema de macrodrenagem urbana como o sistema de microdrenagem são dimensionados para determinados tempos de recorrência, ou seja, desde sua concepção é esperado que para certos eventos de chuva as estruturas hidráulicas e os cursos d'água não sejam capazes de manter os fluxos de água dentro da sua capacidade e a vazão para a qual foram projetados seja excedida, falhando e inundando áreas da cidade não adaptadas para estas falências e atingindo, em geral, pessoas sem a percepção real do risco de inundação (ARMAS e AVRAM, 2009; BRILLY, 2005; BOTZEN, 2009). O sistema de drenagem urbana "*safe-to-fail*" é projetado para falhar com segurança, ou seja, quando submetido a uma chuva de maiores proporções àquelas que foram utilizadas como parâmetro de projeto, falha, mas não compromete ou compromete pouco o funcionamento de outras infraestruturas urbanas, o bem-estar da população e a conservação dos bens.

As infraestruturas robustas que eram concebidas para não falhar baseadas na análise do risco histórico, dão lugar a uma nova concepção, não-estacionária, que é capaz de oferecer uma resistência flexível ao sistema urbano, tornando-o preparado para absorver os impactos dos eventos climáticos extremos com maior frequência, reestabelecendo a normalidade com tempo

reduzido. Como dito anteriormente, entre os vários fatores que contribuem para o aumento dos riscos de inundações, as mudanças no clima e na urbanização são dois dos mais influentes que desafiam as estratégias atuais e futuras de gerenciamento de inundações urbanas. A transição de *fail-safe* para *safe-to-fail* representa um novo paradigma na gestão de sistemas de drenagem urbana, orientado pela resiliência e pela adaptação às incertezas climáticas. Ao adotar uma abordagem mais flexível e adaptativa, os sistemas de drenagem podem se tornar mais eficazes na redução dos riscos de inundação e na promoção da sustentabilidade urbana no longo prazo.

Em suma, a mudança de paradigma de *fail-safe* para *safe-to-fail* representa um avanço significativo na gestão sustentável das águas pluviais urbanas. Essa transição permite uma abordagem mais adaptativa e resiliente, capaz de enfrentar os desafios complexos colocados pelas mudanças climáticas e pela urbanização crescente. No entanto, é fundamental que essa mudança seja acompanhada por políticas públicas e estratégias de implementação eficazes, que promovam a integração e a colaboração entre diferentes atores e setores.

Cabe ressaltar, ainda, a influência da questão econômica de cada cidade ou país, que geralmente dita a disponibilidade de recursos para se construir estruturas mais ou menos resistentes. O sistema de drenagem da lógica de *fail-safe* dificilmente será financeiramente viável de ser implementada na maioria das cidades brasileiras, onde os sistemas de drenagem que são projetados para TR de 25 anos se encontram atualmente, em grande parte, obsoletos. Nesse contexto, destaca-se a necessidade de investimento em medidas não-estruturais de gestão de risco, uma vez que podem ser implementadas mais rapidamente e dependem de recursos financeiros reduzidos quando comparados com medidas estruturais.

3. ESTUDO DE CASO – BAIRRO JARDIM BOTÂNICO, RIO DE JANEIRO

3.1. A HIDROGRAFIA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

O Rio de Janeiro é a segunda maior metrópole do Brasil, e tem grande importância por ter sido palco de grandes acontecimentos da história do país, desde a sua descoberta. Exerce influência nacional do ponto de vista cultural, econômico e político brasileiros. A história e sua vocação natural como cidade portuária moldaram as transformações urbanas e a ocupação do seu solo plano, inserido entre a montanha e o mar. Observando a geografia da cidade do Rio de Janeiro, é possível notar que grande parte do município possui condicionantes naturais que favorecem inundações urbanas, agravados por ações antrópicas, ocorridas ao longo de cinco séculos. Essas ações acarretaram, ao longo do tempo, um crescente número de locais de alagamentos e inundações, com consequências crescentes nas regiões da cidade, ocasionando prejuízos diversos na interrupção de serviços de infraestrutura urbana, na segurança da população, e na economia. O controle da causa desses problemas relacionados à drenagem urbana, em uma cidade consolidada e em funcionamento como o Rio de Janeiro é complexo e demanda um conjunto de ações que envolvem elevados recursos financeiros e grande tempo para a sua efetivação. Tal controle depende também de iniciativas que extrapolam as atuações dos próprios órgãos responsáveis pela drenagem, já que estão relacionados a ações de cunho ambiental, educacional, urbanístico, jurídico, entre outras.

Do ponto de vista hidrológico, o município do Rio de Janeiro apresenta 267 cursos d'água. São rios, córregos, riachos, canais, valões e valas, que apresentam, geralmente, um leito estreito e pouco profundo. Suas águas descem pelos diversos maciços e deságuam na Baía de Guanabara; diretamente no Oceano Atlântico; e na Baía de Sepetiba. A maior concentração de cursos d'água da cidade é na Zona Oeste, onde atravessam as baixadas de Guaratiba e Santa Cruz.

Grande parte dos rios que descem pelos maciços, serras e morros levam para as baixadas grande quantidade de sedimentos, que juntamente com o lixo despejado de forma inadequada nos rios, podem provocar inundações em partes da cidade. Além da sedimentação, muitos destes canais estão em estado avançado de poluição, visto que, além do lixo lançado indevidamente, a poluição aumenta com a ocorrência de despejos irregulares de esgoto, o que diminui consideravelmente as características naturais das águas dos rios, lagoas e baías.

Outro fator de degradação dos corpos d'água do Rio de Janeiro é a construção de habitações ribeirinhas, com a destruição da mata ciliar e o aumento da poluição por resíduos humanos. Vale lembrar que o processo de urbanização e consolidação de bairros da cidade fez com que alguns rios cariocas desaparecessem da paisagem urbana, tendo sido alguns canalizados por intervenções de infraestrutura.

A cidade do Rio de Janeiro possui três macrorregiões drenantes designadas em função dos seus exútorios. São elas a bacia da Guanabara, com todos os rios que deságuam para a Baía de Guanabara; a Bacia Oceânica, compostas pelas Lagoas Oceânicas de Jacarepaguá e pela região da Zona Sul e a Bacia de Sepetiba, formada por rios da Zona Oeste da cidade que deságuam na Baía de Sepetiba. Destacaram-se rios emblemáticos para cada Bacia Hidrográfica, quanto à importância histórica, extensão e relevância para drenagem da região (RIO-ÁGUAS, 2021). Na Figura 10 é possível visualizar as três macrobacias que compõem a hidrografia do Rio de Janeiro.

Figura 10 – Mapa das bacias hidrográficas da cidade do Rio de Janeiro.



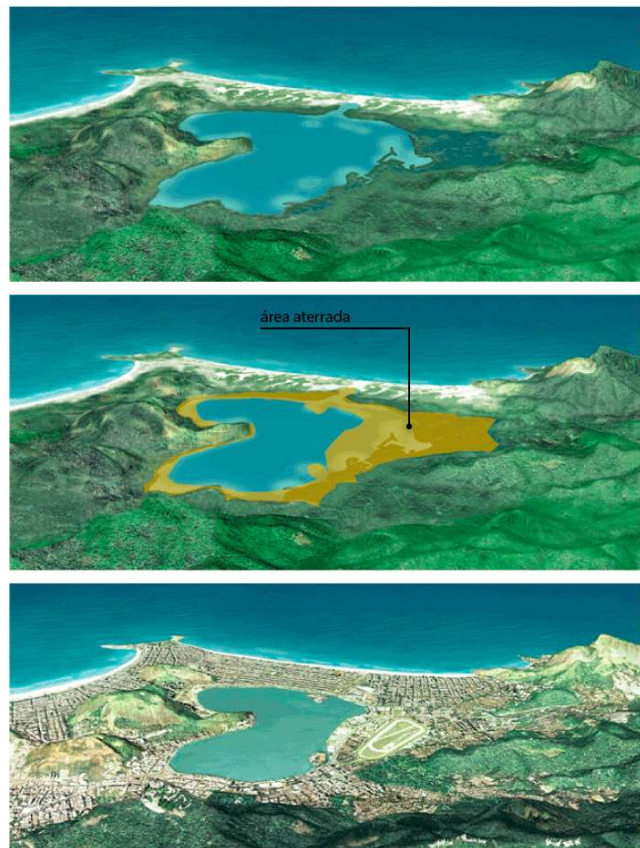
Fonte: Base IPP/DATA.RIO.

A Bacia das Lagoas Oceânicas apresenta área total de 341 km², que corresponde a 27,95% da área total do município do Rio de Janeiro. Essa região teve o seu adensamento com a abertura dos túneis que foi intensificada, entre os anos de 1960 e 1970, sendo a ocupação da região da orla e de seus morros propiciada pela abertura da malha viária implantada (RIO-ÁGUAS, 2021). A bacia do Rio dos Macacos -objeto de estudo do presente trabalho-, é uma sub-bacia da bacia Lagoa Rodrigo de Freitas, que se encontra inserida na Bacia Hidrográfica Oceânica.

variando entre 10 e 18 metros e cota de fundo de -0,70m. O Quadro 3, a seguir, descreve as características dos principais cursos d'água da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas.

A Lagoa Rodrigo de Freitas inicialmente era um braço de mar batendo no sopé do morro do Corcovado que as marés com o tempo foram fechando em uma restinga de areia, formando então uma lagoa. Ao longo do tempo a lagoa perdeu quase a metade de sua superfície, devido a grande quantidade de aterros que sofreu e por conta do acelerado assoreamento devido ao desmatamento das encostas da bacia. Ao todo, a bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas drena uma área de 23,5km², e abrange os bairros do Alto da Boa Vista, Gávea, Humaitá, Ipanema, Jardim Botânico, Lagoa e Leblon (PDMAP, 2014). A Figura 12 mostra a evolução da ocupação da região da Lagoa Rodrigo de Freitas ao longo do tempo, marcando a redução de sua área superficial e a expansão da urbanização. O Quadro 3 mostra os cursos d'água que compõem a Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas, com as informações de cada um sobre sua extensão, localização de sua vertente e foz, e quais bairros da cidade estão inseridos em sua área de abrangência.

Figura 12 – Processo de aterramento e evolução da ocupação urbana na Lagoa Rodrigo de Freitas.



Fonte: Adaptado de Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (2011).

Quadro 3 – Cursos d'água que compõem a Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas

Curso d'água	Extensão (km)	Vertente	Foz	Bairro (s)
Rio Cabeça	2,7	Morro das Paineiras	Lagoa Rodrigo de Freitas	Alto da Boa Vista e Jardim Botânico
Rio dos Macacos	3,8	Morro Vista Chinesa	Lagoa Rodrigo de Freitas	Alto da Boa Vista, Jardim Botânico e Lagoa
Rio do Algodão	1,7	Serra da Carioca	Rio dos Macacos	Alto da Boa Vista e Jardim Botânico
Rio Rainha	3,0	Morro Cochrane	Canal Visconde de Albuquerque	Alto da Boa Vista e Gávea
Riacho Pai Ricardo	1,4	Próximo ao Morro Queimado	Rio dos Macacos	Gávea Pequena
Canal do Jóquei	1,3	Rio Rainha	Rio dos Macacos e Canal Visconde de Albuquerque	Lagoa e Leblon
Canal do Jardim de Alah	0,8	Lagoa	Oceano	Leblon
Canal Visconde de Albuquerque	1,6	Rio Rainha	Oceano	Gávea e Leblon
Lagoa Rodrigo de Freitas	7,4		Canal do Jardim de Alah	Lagoa
Canal do Planetário	1,2		Canal Visconde de Albuquerque	Gávea

Fonte: Rio-Águas (2021).

A Figura 13 mostra os corpos hídricos que compõem a bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas.

Ao sistema de drenagem foi implementado um sistema de comportas com o objetivo de mitigar o aporte de água contaminada oriundo dos afluentes da bacia para a lagoa e para o oceano. Essas comportas se situam nos canais do Jardim de Alah, Avenida Visconde de Albuquerque e Rua General Garzón. Há, no entanto, um efeito negativo associado a presença dessas comportas, que segregam os cursos d'água da bacia dos corpos hídricos receptores gerando efeitos de remanso significativos no sistema de drenagem mais relevantes que possíveis variações nos níveis do mar. Adiante deste trabalho, o funcionamento desse sistema de comportas e seus impactos no sistema de drenagem serão expostos de forma mais detalhada.

Figura 13 – Afluentes da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas.



Fonte: Autora.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIO DOS MACACOS

A bacia hidrográfica do Rio dos Macacos engloba parte dos bairros o Jardim Botânico, Lagoa, Gávea e Alto da Boa Vista. O bairro do Jardim Botânico possui uma das maiores rendas per capita da bacia, e o bairro da lagoa, por sua vez, uma das maiores rendas per capita do município do Rio de Janeiro. A bacia tem importância estratégica para a cidade, por estar diretamente ligada a corpos receptores de complexa gestão ambiental, por conter diversos pontos turísticos e algumas das mais movimentadas vias de trânsito da Zona Sul do município. Além da Lagoa Rodrigo de Freitas e da praia do Leblon, que são algumas das paisagens mais visitadas do Brasil, outros pontos turísticos podem ser destacados, próximos ou dentro da bacia: o parque do Jardim Botânico, a Vista Chinesa e as Paineiras, além do acesso à estátua do Cristo Redentor. No que diz respeito a mobilidade urbana, a bacia do Rio dos Macacos é atravessada pela Rua Jardim Botânico e pela Avenida Borges de Medeiros, ambas importantes vias de acesso ao centro da cidade e à Barra da Tijuca, bairros com atividade econômica muito intensa. A estrada Lagoa-Barra possui elevado fluxo, com tráfego diário de cerca de 70 mil veículos, somando ambos os sentidos, de acordo com dados da Companhia de Engenharia de Tráfego do Rio de Janeiro - CET-Rio.

O relevo da bacia é característico do Estado do Rio de Janeiro, com maciços e baixadas litorâneas. A encosta da serra ocupa a maior parte do território da bacia e, ao longo desse percurso, recebe denominações diferentes, como Maciço da Tijuca, Serra da Carioca e Serra do Corcovado. No morro do Sumaré, no qual se encontram torres de transmissão de televisão brasileiras, as elevações chegam a mais de 700m. A serra decai rapidamente até a Lagoa Rodrigo de Freitas. Sua encosta possui densas florestas, distribuídas pelo Vale do rio dos Macacos, nas Paineiras, na estrada do Sumaré, bem como na Floresta da Tijuca. Os mirantes das Paineiras, do Andaraí Pequeno, do Passo do Inferno, da Mesa do Imperador e da Vista Chinesa compõem pontos notáveis de observação da bacia. Próximo ao parque do Jardim Botânico, na região do Horto, ocorre o início da ocupação das encostas por construção de habitações irregulares. Caso essa tendência seja mantida e expandida, uma grande parte da cobertura vegetal e da parcela de solo permeável da bacia poderá ser perdida, intensificando o risco de inundações na região (MIGUEZ *et al.*, 2012). A Figura 14 mostra a localização da Bacia do Rio dos Macacos e seus afluentes.

Figura 14 – Delimitação da Bacia do Rio dos Macacos e seus afluentes sobre foto aérea.



Fonte: Autora.

O Jardim Botânico e o Jockey Clube Brasileiro se destacam na paisagem da bacia, que apresenta ainda uma grande área verde nas regiões mais baixas, com predominância de florestas em suas vertentes, contrastando com uma ocupação urbana intensa nas áreas baixas, junto à Lagoa Rodrigo de Freitas. A bacia do Rio dos Macacos, porém, apesar da conservação da vegetação de suas encostas, sofre com inundações, cuja marca de referência é o alagamento da Rua Jardim Botânico, importante via de comunicação entre a Zona Sul e a Zona Oeste (MIGUEZ *et al*, 2012).

Os bairros litorâneos de Ipanema e Leblon ocuparam a restinga de areia entre o mar e a lagoa a partir da década de 1920. Primeiramente, foram construídos casas e chalés, seguidos pelos edifícios a partir dos anos 50. O contato entre as águas do mar e da lagoa, que antes dependia da maré alta, agora é feito pelo canal do Jardim de Alah -um canal artificial com cerca de 800m de extensão e largura variável entre 10 e 18m, localizado entre as praias de Ipanema e Leblon-. Pelo movimento das marés, o deságue no mar está frequentemente assoreado, o que prejudica a renovação das águas. Algumas intervenções já foram feitas, como a fixação do canal do Jardim de Alah, a construção dos canais do Jockey, do Rio dos Macacos, na Rua General Garzón e no rio Rainha (altura da Rua Visconde Albuquerque), foram executadas, mas não foram suficientes para possibilitar a renovação de águas. Para manter desassoreado os canais

são dragados diariamente, o que apenas permite uma saída lenta das águas do canal (PDMAP, 2014).

Desde a década de 1980 o espelho d'água está legalmente protegido, porém a urbanização desordenada e a insuficiência dos sistemas de drenagem da região vêm contribuindo para o agravamento dos problemas ambientais, tanto os de qualidade da água da Lagoa, quanto as inundações deflagradas por chuvas intensas (PDMAP, 2014). Apesar da boa conservação da vegetação das encostas da bacia, ela sofre com frequentes inundações. Quando o sistema de drenagem urbana falha, as estruturas urbanas passam a exercer funções hidráulicas, gerando uma complexa rede de escoamentos. Canais vertem para ruas e estas passam a atuar como condutos complementares, alagando quadras e passando a integrar a rede de drenagem à paisagem urbana. No caso da bacia do Rio dos Macacos, a situação se torna ainda mais complexa, em função da interação com a lagoa e, em última análise, com o mar. Na sua condição atual, o Rio dos Macacos também interage com a bacia do Rio Rainha, por meio de um canal de drenagem que passa por dentro do Jockey Clube Brasileiro, permitindo escoamento nos dois sentidos, dependendo dos níveis d'água nos rios principais das duas bacias (MIGUEZ *et al*, 2012).

Assim como em grande parte dos corpos hídricos na cidade do Rio de Janeiro, a falta de coleta seguida de tratamento adequado de esgoto são as principais causas da degradação ambiental da bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas, que possui seu entorno altamente urbanizado. As águas poluídas são descarregadas por diversos tributários, embora exista rede de esgotamento sanitário. Nesse contexto, a contribuição das galerias de águas pluviais contaminadas que deságuam na lagoa é significativa (PDMAP, 2014).

A bacia hidrográfica do Rio dos Macacos drena uma área de aproximadamente 9,8km², sendo a principal bacia contribuinte da Lagoa Rodrigo de Freitas. Sua área de drenagem abrange parcialmente os bairros do Alto da Boa Vista, Jardim Botânico e Lagoa, localizados na Macrozona de ocupação controlada, segundo Plano Diretor de desenvolvimento Sustentável da Cidade do Rio de Janeiro. O Rio dos Macacos nasce na Serra da Carioca, integrante do Parque Nacional da Tijuca, importante Unidade de Conservação Federal. O canal tem início no Horto Florestal do Jardim Botânico e segue em direção ao sul paralelamente a Rua Pacheco Leão. Neste trecho inicial, o canal possui geometria variável, fundo pedregoso e margens com alguns trechos de vegetação e outros com paredes em concreto e alvenaria pertencentes aos muros de construções lindeiras. Essa tipologia de canal se estende até o início do Jardim Botânico,

próximo à Aleia Frei Veloso, onde o canal possui geometria retangular com fundo e paredes com pedras argamassadas. Esse trecho possui degraus ao longo do canal e pequenas bacias de amortecimento que visam diminuir a velocidade do escoamento (PDMAP, 2014).

O principal rio da bacia é o próprio Rio dos Macacos, com cerca de 4,46km desde a região mais alta de encosta, onde nasce, passando por um trecho em galeria sob a Rua Jardim Botânico e chegando, por fim, até a lagoa, o Rio dos Macacos recebe a contribuição de vários córregos pela margem esquerda, vindos das vertentes do maciço da Tijuca. Destaca-se especialmente a contribuição do Rio Cabeça, seu principal tributário, que aflui ao curso principal em confluência na Rua General Garzón. Pela margem direita, também em região próxima à sua foz, ocorre uma situação de possível transposição de vazões entre a bacia do Rio dos Macacos e a bacia do Rio Rainha.

O canal que chega pelo Jôquei Clube Brasileiro liga as duas bacias, com fundo praticamente plano. Em condições de cheia, dependendo da intensidade do fenômeno em cada bacia, as vazões do Rio Rainha podem chegar ao Rio dos Macacos, ou, ao contrário, o Rio dos Macacos pode passar a desaguar também na praia do Leblon, a partir do canal da Rua Visconde de Albuquerque. O exutório da bacia ocorre na Lagoa Rodrigo de Freitas, junto ao Clube Naval Piraquê, através de um canal artificial que segue pela Rua General Garzón. Junto à sua foz existe uma comporta, que permanece fechada durante a maior parte do tempo, cuja função é impedir que o rio em estiagem (com contribuições irregulares de esgoto sanitário) contribua para o corpo d'água receptor, degradando-o. Vale destacar que apesar da comporta ser eventualmente aberta em períodos de cheias, sua abertura não ocorre de maneira integral, ocasionando uma restrição hidráulica significativa na região mais propensa a inundações da bacia hidrográfica. A Figura 15 apresenta a comporta do Rio dos Macacos em uma situação de estrutura aberta e fechada.

Figura 15 – Comporta do Rio dos Macacos localizada Rua General Garzón fechada na primeira imagem, e aberta na segunda imagem.



Fonte: Acervo dos autores.

A urbanização se desenvolve principalmente nas áreas mais baixas e planas, espalhando-se em uma estreita, porém extensa faixa de área impermeabilizada, entre a Lagoa Rodrigo de Freitas e o maciço da Tijuca. Em eventos de chuva intensa, é usual o alagamento das ruas mais baixas da bacia, em especial da própria Rua Jardim Botânico, onde a rede de drenagem mostra-se insuficiente.

Na área do Jardim Botânico o canal é raso com profundidade média de 1,5m, geometria retangular, com paredes em concreto, largura variável entre 3,8m e 5,0m e declividade média de 0,0062m/m. O curso d'água principal possui um canal de derivação, que direciona parte das águas, atravessando o Jardim Botânico e desembocando no canal do Jockey. Ao chegar próximo ao cruzamento entre a Rua Pacheco Leão e a Rua Jardim Botânico, o rio passa a escoar em galeria até encontrar o canal aberto da Rua General Garzón. Este trecho de canal possui seção trapezoidal com base de 4,0m, profundidade 2,5m, sofrendo a influência do nível da Lagoa Rodrigo de Freitas e recebendo ainda as contribuições do canal da Avenida Lineu de Paula Machado e do canal do Jockey Club (PDMAP, 2014).

A proximidade das encostas da bacia, aliada à transição brusca destas para áreas de baixada, resultantes de aterros, indica a tendência de ocorrência de escoamentos velozes chegando às planícies, nas quais podem produzir inundações em função da mudança de declividade. Embora na maior parte de seu trajeto o Rio dos Macacos escoe em áreas de preservação, como o Parque Nacional da Tijuca, o Horto Florestal e o Jardim Botânico, existem

pequenos trechos de canal em meio de quadra e ao longo de vias onde ocorre inundação localizada. Segundo o Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais do Município do Rio de Janeiro (PDMAP), o primeiro deles ocorre à montante do Jardim Botânico, em um trecho onde o canal escoava em meio de quadra, entre a Rua Pacheco Leão e a Estrada do Grotão, na altura da Rua Marquês de Sabará. Nesse trecho, de aproximadamente 600m de extensão, há ocupação irregular das margens e construções imediatamente adjacentes às paredes do canal, e são observadas inundações recorrentes. Outro ponto frequente de inundações ocorre no entroncamento da Rua General Garzón com a Av. Lineu de Paula Machado. Neste trecho, o canal do Rio dos Macacos conflui com o seu principal afluente, o Rio Cabeça, e com o Canal do Jóquei, canal de declividade nula e fluxo reversível conforme os níveis d'água na Lagoa e no Oceano.

Os pontos mais críticos de inundação identificados são:

- Rua Von Martius;
- Rua Pacheco Leão entre o número 650 (aprox.) e a Rua Jardim Botânico;
- Rua Visconde de Carandaí;
- Rua 86;
- Rua Jardim Botânico entre a Associação de Amigos do Jardim Botânico e a
- Rua Lopes Quintas;
- Rua General Garzón;
- Avenida Lineu de Paula Machado entre a Rua General Garzón e a Rua Saturnino de Brito.

Na Figura 16 é possível visualizar em mapa a localização das áreas inundadas descritas no PDMAP. Mais adiante neste trabalho será verificado se os trechos de inundações pontuados no PDMAP coincidem com o modelo hidrodinâmico construído.

Os rios Algodão e Cabeça, afluentes ao Rio dos Macacos, que se encontram mais a leste da bacia, não deságuam diretamente no rio principal. Ao chegarem no trecho inferior, eles escoam por galerias que sairão nos canais da Rua Batista da Costa e da Avenida Lineu de Paula Machado, que chegam ao Rio dos Macacos. As contribuições de escoamento superficial das sub-bacias do Riacho do Pai Ricardo e do Rio Cabeça são as mais significativas, com as maiores áreas de drenagem dentre as descritas.

O restante da bacia é formado por trechos de parques, ruas, calçadas e edificações. Essas construções se encontram no trecho inferior, onde as inundações provocam maiores problemas econômicos e um maior impacto no trânsito da cidade. Nessa região, é possível destacar o Jóquei Clube Brasileiro e o Jardim Botânico como áreas com menores coeficientes de geração de escoamento superficial e com baixas declividades. Em contrapartida, os trechos mais impermeáveis e com maior movimentação de veículos são as ruas Jardim Botânico e Pacheco Leão e as avenidas Lineu de Paula Machado e General Garzón, além dos seus arredores (MIGUEZ *et al.*, 2012).

3.4. HISTÓRICO DE OCUPAÇÃO DO BAIRRO JARDIM BOTÂNICO

A chegada da Família Real e da corte portuguesa à cidade do Rio de Janeiro em 1808 promoveu mudanças no espaço e no cotidiano, chegando na Baía de Guanabara em março de 1808. Neste primeiro momento, foram abrigados em residências situadas na Praça XV, até que a infraestrutura adequada pudesse ser construída. As intensas transformações ocorridas no espaço urbano fizeram com que a cidade se consolidasse como centro da monarquia. Estas transformações envolviam o trabalho com aterros e drenagem sobre brejos e lagoas e ações quanto a condição de segurança (IPP, 2003 apud MIGUEZ *et al.*, 2012).

Em meados do século XVI, após a posse do governador Cristóvão de Barros, em 1571, o Engenho d'El Rey é fundado no local onde atualmente se encontra o Jardim Botânico, às margens de uma lagoa conhecida pelo nome indígena Çapôpenypau, que significa “lagoa das raízes chatas”. No século XVII, a região foi dividida em dois outros engenhos: o de Nossa Senhora da Cabeça e o de Nossa Senhora da Conceição da Lagoa. Em 1611, o proprietário do Engenho de Nossa Senhora da Conceição da Lagoa, Sebastião Fagundes Varela, passa a propriedade para seu genro, Rodrigo de Freitas Mello e Castro, cujos herdeiros conservaram a posse das terras até o início do século XIX. Nesse momento, a Lagoa ganha então a sua atual

denominação – Lagoa Rodrigo de Freitas. Durante mais de dois séculos, a propriedade permaneceu com os herdeiros de Rodrigo de Freitas.

A chegada da família real, no início do século XIX, levou a implantação da Fábrica Real de Pólvora nas margens da Lagoa e à criação do Horto Imperial, precursor do atual Jardim Botânico. Após a implantação da fábrica destinada à pulverização de pólvora, fundição de ferro e torneamento de armas de fogo nas margens da Lagoa. Após alguns meses, D. João VI decretou a criação de um Jardim de Aclimação no mesmo terreno da fábrica, com o intuito de aclimatar as espécies vegetais oriundas de outras regiões do mundo. O Jardim de Aclimação foi fundado em junho de 1808 e favoreceu a preservação e a conservação de diversas espécies vegetais, a introdução da cultura do chá preto e de especiarias do Oriente.

A fábrica sofreu um incêndio ainda na primeira metade do século XIX, e parte das suas ruínas se manteve preservada no Jardim Botânico, assim como o pórtico da extinta Real Academia de Belas Artes. A partir da segunda metade do século XIX, com o declínio da produção de cana-de-açúcar, os diversos engenhos foram desativados e as fazendas se fragmentaram em chácaras de menores dimensões.

Em 1868, a Princesa Isabel e o Conde D'Eu, herdeiros do trono brasileiro, receberam como presente de casamento uma vasta área de terras no bairro Jardim Botânico. No início do século XX, o Jardim Botânico e o bairro ao seu redor passaram por transformações urbanísticas e paisagísticas, com a abertura de novas ruas e a criação de praças e parques. A arquitetura do bairro nesse momento, passa a ser marcada por suas mansões e casas coloniais.

A chegada do bonde, em 1871 – inicialmente à tração animal, depois substituídos por elétricos, em 1902 – trouxe grande valorização aos terrenos das chácaras remanescentes. No final do século XIX, tem início a ocupação da área por indústrias têxteis com suas vilas operárias. Essa ação transforma os bairros da Gávea e do Jardim Botânico em uma das regiões mais industrializadas do Rio de Janeiro no final do século XIX. Nos primeiros anos do século XX, o então prefeito Pereira Passos iniciou um plano de reforma urbana que incluía o saneamento da Lagoa Rodrigo de Freitas. Na administração do prefeito Carlos Sampaio (1920-1922), importantes obras foram realizadas pelo sanitarista Saturnino de Brito, referentes ao aterramento e saneamento na orla da Lagoa, que tem sua geometria modificada. A Avenida Epitácio Pessoa é inaugurada e são regularizados o canal de escoamento do Jardim de Alah e o

canal no eixo da Avenida Visconde de Albuquerque, no Leblon. Em 1926, foi fundado o Jockey Clube Brasileiro.

Na década de 1940, foram fechadas as fábricas têxteis, encerrando a fase industrial do bairro do Jardim Botânico. Com o retalhamento das antigas chácaras ao longo da primeira metade do século XX e a saída das fábricas da região, os terrenos locais foram loteados, dando espaço a nova função predominantemente residencial do bairro. É nas áreas que circundam a Lagoa Rodrigo de Freitas, especialmente na orla do Jardim Botânico, que surgem os primeiros núcleos residenciais dos bairros.

A expansão do Jardim Botânico se faz mediante aterramentos realizados em direção ao Vale dos Macacos e ao talude do Corcovado. Esses novos lotes são inicialmente tomados por casarões e, posteriormente, ocupados por edifícios de apartamentos de luxo. O governador Carlos Lacerda, por sua vez, retirou algumas favelas da região e inaugurou, em 1967, o Túnel Rebouças, que permanece ainda como uma das principais ligações entre as zonas Norte e Sul da cidade. Em 1975, o prefeito Marcos Tamoyo promulgou um decreto que proibia qualquer alteração adicional no espelho d'água da Lagoa. No mesmo ano, o prefeito estabelece o alinhamento das margens e a sua utilização para fins recreativos, sendo em seguida criado o Parque da Catacumba, após a remoção da favela que ali existia.

Desde a sua fundação, o Jardim Botânico recebeu diversos nomes: Jardim de Aclimação, Real Horto, Real Jardim Botânico, Jardim Botânico e por fim, Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, a partir de 1996 (IPJBRJ, 1996). Ao longo dos anos, o bairro Jardim Botânico continuou a ser uma área de destaque no Rio de Janeiro, combinando a presença do Jardim Botânico, áreas verdes, espaços culturais e arquitetura são memórias de sua história. Nesse sentido, o bairro possui um contexto histórico e geográfico que influencia a proteção de seu patrimônio natural e construído. Para preservar o patrimônio histórico e arquitetônico do Jardim Botânico, ações de tombamento, regulamentações urbanísticas e políticas de preservação são aplicadas pelo Poder Público.

O tombamento é uma das principais formas de proteção das construções históricas no Brasil. Quando um bem é tombado, ele se torna oficialmente reconhecido como patrimônio cultural e fica sob proteção legal, o que implica em restrições às modificações ou demolições que possam descaracterizá-lo. Assim, muitas das construções no bairro Jardim Botânico são tombadas ou têm algum tipo de proteção, o que ajuda a garantir sua conservação ao longo do tempo. O

tombamento da Chácara do Algodão foi uma das primeiras manifestações de preservação no bairro do Jardim Botânico, solicitado pela Associação dos Moradores em 1986. Por seu interesse histórico, ecológico e cultural, as edificações remanescentes da Companhia de Fiação e Tecelagem Carioca constituem um valioso documento da história têxtil carioca. Na Figura 17 é possível visualizar uma fotografia histórica da Chácara do Algodão.

Figura 17 – Rua Alberto Ribeiro, Chácara do Algodão.



Fonte: Guia das APACs nº 14, Prefeitura do Rio (2012).

A criação das Áreas de Proteção do Ambiente Cultural (APACs) na cidade do Rio de Janeiro teve início com o Projeto Corredor Cultural em 1979. Esse projeto foi transformado em legislação municipal e seu objetivo era proteger as características arquitetônicas das fachadas, volumetrias, formas de cobertura e prismas de claraboias de imóveis localizados na Área Central de Negócios que não haviam sido alvo das transformações urbanas ocorridas nas décadas de 50 a 70 do século passado. A partir de 1984, 33 APACs foram criadas na cidade do Rio de Janeiro, incluindo as Áreas de Entorno de Bens Tombados (IRPH, 2012).

Com a implementação do primeiro Plano Diretor Decenal da cidade em 1992, as APAs foram transformadas em APACs, reservando a denominação "APA" (Área de Proteção Ambiental) apenas para áreas naturais. Uma APAC é composta por imóveis, como casas térreas, sobrados e prédios de diferentes tamanhos, bem como passeios, ruas, praças e pavimentações.

Sua atmosfera, conjunto arquitetônico, aparência, cheiros, particularidades, valores culturais e modos de vida conferem uma identidade própria a cada área urbana (IRPH, 2012).

A APAC protege conjuntos arquitetônicos que, por suas características, conferem qualidades urbanas à região, sem, contudo, impedir o seu desenvolvimento. Através da criação de uma APAC, a legislação urbana estabelece quais imóveis devem ser preservados, como fachadas, coberturas (formas e materiais), volumetria, claraboias e outros elementos arquitetônicos relevantes. Outros imóveis podem ser renovados ou até mesmo substituídos, desde que sejam respeitados os parâmetros que preservem a atmosfera característica. A legislação das APACs também pode estabelecer novos parâmetros urbanos, como limites de altura para edificações, atividades e usos adequados, e condições de parcelamento do solo. Dessa forma, são criadas as condições necessárias para que a cidade possa preservar sua memória urbana, mantendo sua imagem cultural e, ao mesmo tempo, se adaptando às demandas contemporâneas.

As APACs podem variar em tamanho, desde a preservação de um conjunto de imóveis situados em uma única rua, até áreas que compreendem um ou mais bairros. Atualmente, a Subsecretaria de Patrimônio detém a tutela de 36 áreas urbanas protegidas, entre APACs e áreas de proteção de entorno de bens tombados, localizadas nas Zonas Norte, Sul, Oeste e Central da Cidade e que incluem cerca de 30 mil imóveis, entre bens tombados, preservados e tutelados (IRPH, 2012).

Na área que compreende a Bacia do Rio dos Macacos, estão inseridas três APACs: Chácara do Algodão, Jardim Botânico e Hipódromo da Gávea. Nas Figuras 18 e 19 é possível visualizar a delimitação dessas APACs.

Além das áreas urbanas preservadas, há três áreas de proteção ambiental: o Parque Nacional da Tijuca, a Zona de Amortecimento do Parque Nacional da Tijuca e a Área de Preservação Ambiental do Jockey Club Brasileiro.

Figura 18 – Delimitação da APAC Chácara do Algodão (1) e Jardim Botânico (2).



Fonte: Guia das APACs nº 14, Prefeitura do Rio (2012).

Figura 19 – Delimitação da APAC do Hipódromo da Gávea.

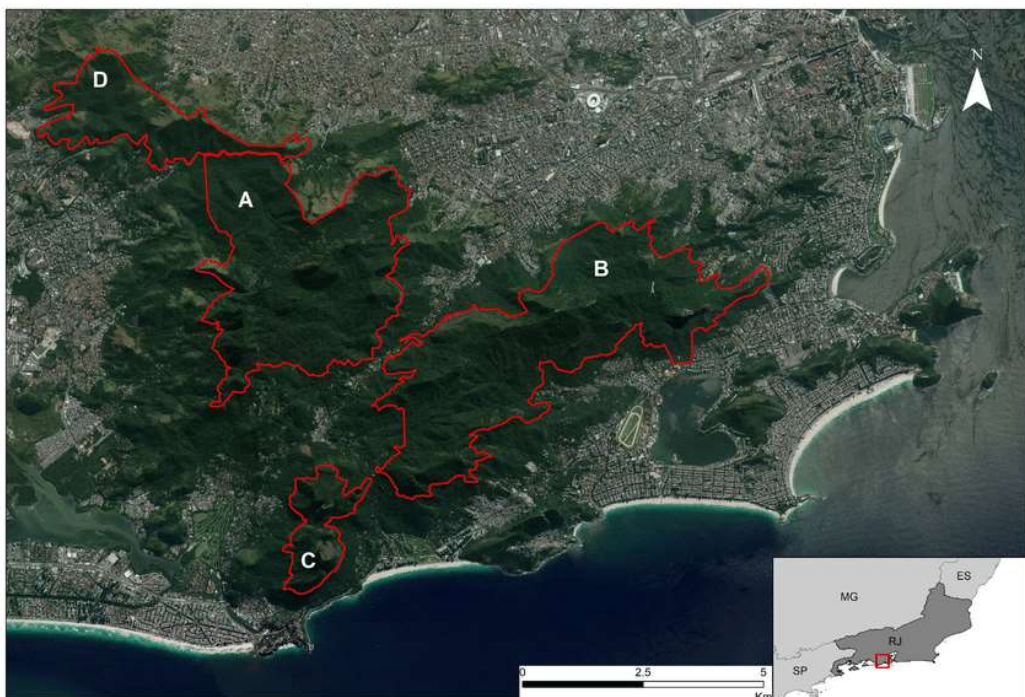


Fonte: Guia das APACs nº 14, Prefeitura do Rio (2012).

A cidade do Rio de Janeiro, de modo geral, é caracterizada por sua geografia acidentada e por rios que cortam áreas urbanas, aumentando a predisposição física do território para a ocorrência de inundações. O Jardim Botânico sofre historicamente com inundações de grandes proporções diante a ocorrência de chuvas intensas e contínuas, com o transbordamento dos rios, canais e da própria Lagoa Rodrigo de Freitas. Essas inundações podem causar danos às propriedades e infraestrutura local, além de representarem riscos à segurança da população.

O bairro Jardim Botânico está situado em uma região próxima à Floresta da Tijuca, o que aumenta a presença de vegetação e a permeabilidade do solo. No entanto, o crescimento urbano que se deu ao longo dos séculos, descrito anteriormente, ocasionou o aumento da impermeabilização do solo nas áreas urbanizadas, reduzindo a capacidade de absorção das chuvas e agravando a ocorrência de inundações nessa área da cidade. O Parque Nacional da Tijuca é uma das maiores unidades de conservação situadas em um centro urbano. Possui 3.953ha de área, divididos em quatro setores: Floresta da Tijuca; Serra da Carioca; Pedra Bonita e Pedra da Gávea; e Pretos Forros e Covanca. É caracterizado pela grande variedade de habitat, com altitudes que variam de 80 a 1.021m; possui afloramentos rochosos, cursos e quedas d'água (BICALHO e MYNSSSEN, 2020). Na Figura 20 é possível visualizar os setores do parque.

Figura 20 – Localização do Parque Nacional da Tijuca, na cidade do Rio de Janeiro, com indicações dos setores. A -Floresta da Tijuca; B -Serra da Carioca; C -Pedra Bonita/Pedra da Gávea; e D -Pretos Forros e Covanca.



Fonte: Bicalho e Mynssen (2020).

4. ESTRUTURA METODOLÓGICA

No Tópico 4.1 serão descritos os métodos escolhidos para alcançar o objetivo geral proposto. No Tópico 4.2 serão apresentadas as ferramentas utilizadas para a aplicação do método. No Tópico 4.3, as etapas práticas serão articuladas em um quadro metodológico composto, para sua melhor compreensão, de forma integrada para a consecução dos objetivos postulados.

4.1. MÉTODOS

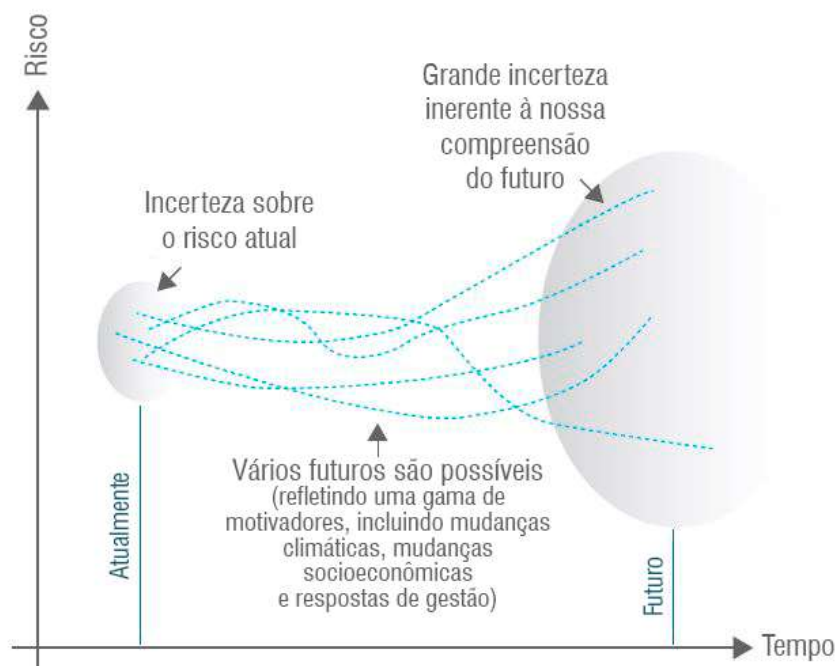
4.1.1. Método de simulação de efeitos das mudanças climáticas

Hoje, ainda não existe uma ferramenta confiável para medir os efeitos das mudanças climáticas - a incerteza é uma característica inerente às mudanças atribuídas ao clima: não se sabe como, quanto, quando nem onde o planeta sofrerá suas consequências. Ainda que se conseguisse mensurar os impactos, por exemplo, através de uma correlação direta entre a quantidade de emissão de gases de efeito estufa e as mudanças do clima, teríamos que lidar com a incerteza de como e em que quantidades essas emissões se dariam por nós e pelas gerações futuras. Na tentativa de desenhar possíveis cenários futuros de emissões de gás carbônico, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) produziu um relatório de diferentes cenários possíveis - no total, o estudo contemplou 40 cenários diferentes.

Mesmo que tivéssemos a certeza de que um desses cenários representa a realidade, ou que tivéssemos uma previsão precisa do aquecimento global, dificilmente conseguiríamos mensurar seus efeitos sobre a ocorrência de tempestades, tornados, terremotos, furacões e tsunamis. Diante disso, um dos maiores desafios das mudanças climáticas é lidar com sua imprevisibilidade e traçar estratégias efetivas para que suas consequências sejam evitadas.

A Figura 21 é um gráfico ilustrativo das tendências de crescimento das incertezas associados ao risco no tempo.

Figura 21 – Tendência do crescimento de incertezas no tempo



Fonte: Adaptado de SAYERS, 2013.

Segundo Lemos (2010), os efeitos das mudanças climáticas não são globais, no sentido de que não se repetirão da mesma forma sobre todo o globo. Esses efeitos podem variar de acordo com cada área e apresentar diferentes tipos de variação: as mudanças climáticas podem interferir em determinada variável, como a chuva, de diferentes maneiras.

Em relação ao regime de chuvas, as mudanças no cenário climático podem acarretar diferenças de média, frequência ou variação. Por exemplo, a média de chuvas em uma determinada área pode se manter, mas chuvas mais intensas e períodos de seca mais intensos podem surgir de formas que antes não ocorriam (alteração na variação). Por outro lado, se ocorrerem chuvas mais intensas, sem alteração de mínimos, haverá também um deslocamento da média. A frequência também pode variar (com eventos máximos e mínimos se tornando mais frequentes) e pode-se imaginar, ainda, a combinação da alteração na variação e na frequência, simultaneamente (LEMOS, 2010).

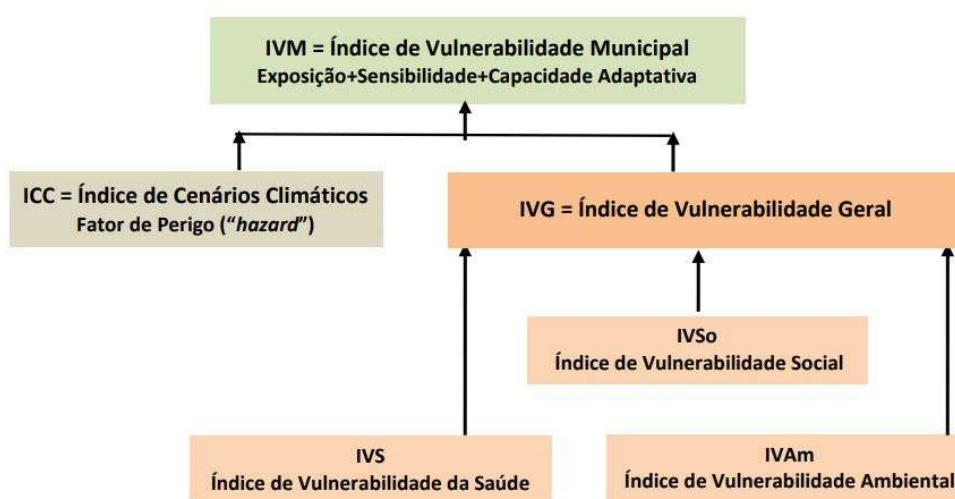
Apesar da imprevisibilidade dos efeitos das mudanças globais, as estatísticas de eventos climáticos nos apontam algumas tendências, ainda que incertas, sobre o futuro. Nesse sentido, o aumento de eventos climáticos extremos, como as tempestades e as secas é um dos indícios das mudanças do clima sentidas em diversas partes do planeta.

No Estado do Rio de Janeiro, estas alterações climáticas podem ser observadas, dentre outros aspectos, no aumento da ocorrência de desastres naturais e de problemas de saúde da população, tais como o crescimento do número de casos de dengue e leptospirose, bem como o número de mortes ocasionadas pelos desastres decorrentes de chuvas intensas (BARATA *et al.*, 2014).

Para fazer a previsão do cenário climático futuro da cidade do Rio de Janeiro, foi utilizado como base o relatório “Mapa de vulnerabilidade da população dos municípios do Estado do Rio de Janeiro frente às mudanças climáticas” realizado por pesquisadores do Instituto Oswaldo Cruz (IOC/FIOCRUZ), em parceria com a Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca (ENSP/FIOCRUZ) e a FIOCRUZ-Minas. Esse estudo teve como objetivo indicar a exposição dos municípios do estado às mudanças climáticas previstas para as próximas décadas.

A metodologia desse estudo foi desenvolvida para a execução do mapeamento da vulnerabilidade socioambiental e de saúde do Brasil, em nível nacional e regional, aos possíveis efeitos da mudança climática global na saúde. O modelo conceitual subjacente a esta avaliação de vulnerabilidade está representado na Figura 22.

Figura 22 – Modelo conceitual do projeto de vulnerabilidade para os municípios do ERJ.



Fonte: Barata *et al.*, 2014.

O IVM possui duas medidas principais: o IVG, que reflete a condição dos sistemas municipais sob risco de serem afetados pelo clima futuro, e o ICC, que está relacionado às mudanças climáticas. As variáveis e indicadores incluídos nessa métrica capturam três

características básicas da vulnerabilidade: exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa (ou de resposta). Neste estudo, a estas três camadas foram agregadas informações sobre o “fator de perigo”, representado por anomalias de parâmetros climáticos, projetadas para as próximas décadas (BARATA *et al.*, 2014).

Para efeito de cálculo, o estudo considerou dois cenários apresentados no relatório de cenários de emissões de gás carbônico do IPCC. Os cenários escolhidos apresentam direções alternativas de mudanças no sistema energético, distintos pela ênfase tecnológica: cenário A1FI – *fóssil intensiva* (intensiva no uso de combustíveis fósseis -cenário mais pessimista) e cenário A1T (utilização de fontes energéticas não-fósseis -cenário menos pessimista).

Para efeito da inserção da variável climática no cálculo da vulnerabilidade, foram utilizadas as diferenças entre os dados obtidos para cada município referentes ao período atual e futuro, conforme descrito no Quadro 4. A diferença das médias das variáveis entre ambos os períodos se denomina “anomalia climática” (BARATA *et al.*, 2014).

Quadro 4 – Dados de Temperatura e Precipitação para cada Município do ERJ.



Fonte: Barata *et al.*, 2014.

As anomalias climáticas mensuram a variação esperada nos valores de precipitação e temperatura. Calculados desta forma, valores de anomalia climática positivos indicam aumento esperado nos níveis de precipitação e temperatura, enquanto valores negativos indicam redução de níveis. Valores de anomalia próximos ou iguais a zero indicam que os níveis de precipitação e temperatura projetados são iguais ou muito próximos aos observados no período atual (*baseline*) (BARATA *et al.*, 2014).

Os resultados indicam que as anomalias climáticas projetadas para o Estado do Rio de Janeiro, considerando-se os cenários A1FI e A1T para o período 2010-2040, mostram uma tendência de redução da precipitação média e aumento da temperatura. Há, entretanto, variações geográficas deste padrão, bem como diferenças relacionadas à intensidade das anomalias, de acordo com os cenários avaliados. Com relação à temperatura, em ambos os cenários há uma clara tendência de aumento positivo das anomalias para todo o Estado. No cenário A1T, as anomalias climáticas são, de um modo geral, menos intensas. As variações de anomalias no cenário A1T enquadram-se no intervalo de 0,34 a 1,69 °C, ao passo que, no cenário A1FI, situam-se entre 1,39 e 2,26 °C (BARATA *et al.*, 2014).

Com relação à precipitação, predominam anomalias positivas no cenário A1T, as quais são maiores nos municípios litorâneos e entorno imediato e na Macrorregião Noroeste Fluminense. No cenário A1FI, também predominam anomalias positivas, sendo que as mais severas se concentram nas macrorregiões Metropolitana do Rio de Janeiro, Baixadas Litorâneas, Serrana, Médio Paraíba e Costa Verde. Na maior parte da Macrorregião Norte, as anomalias de precipitação são positivas, porém pouco expressivas com relação ao cenário A1T (BARATA *et al.*, 2014).

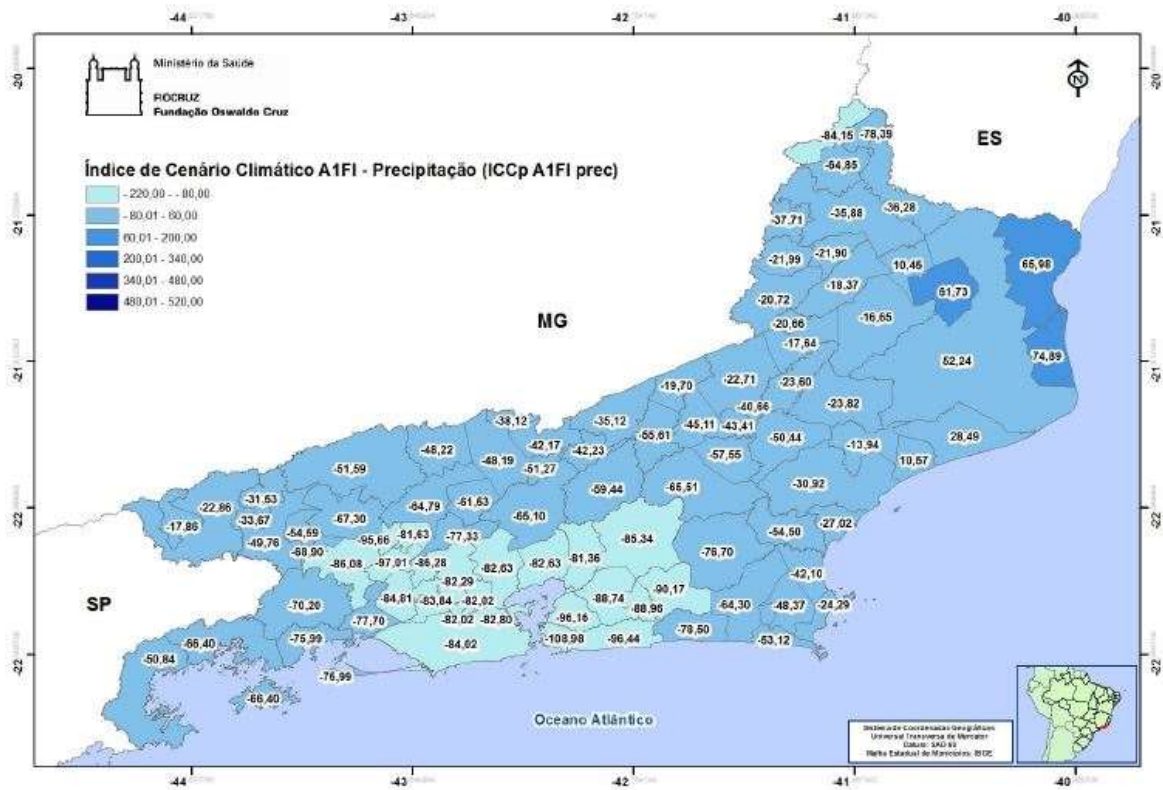
As Figuras 23 e 24 mostram os mapas do Índice de Cenário Climático (ICC) em relação a precipitação considerando os cenários A1FI e A1T, respectivamente, para os municípios do Estado do Rio de Janeiro. A cidade do Rio de Janeiro apresenta anomalia negativa no cenário A1FI (-84,02), o que indica redução esperada dos níveis de precipitação média, enquanto no cenário A1T apresenta anomalia positiva (+337,49), o que indica aumento esperado dos níveis de precipitação.

Segundo Zilli *et al.* (2016), em artigo publicado sobre a alteração no padrão de chuvas para a região Sudeste do Brasil, a previsão para o Estado do Rio de Janeiro é de redução no volume médio da precipitação para os próximos anos (em concordância com o estudo da FIOCRUZ para o cenário A1FI), mas com concentração em menos dias e ocorrência de mais eventos extremos. Ou seja, afirma que deverá chover menos, mas com chuvas mais intensas. Isso é coerente com o aumento de temperatura, que favorece as chuvas convectivas, típicas de eventos intensos.

Dereczynski *et al.* (2013), através da detecção e projeção futura das mudanças climáticas na cidade do Rio de Janeiro, obteve resultados que demonstram que a quantidade de

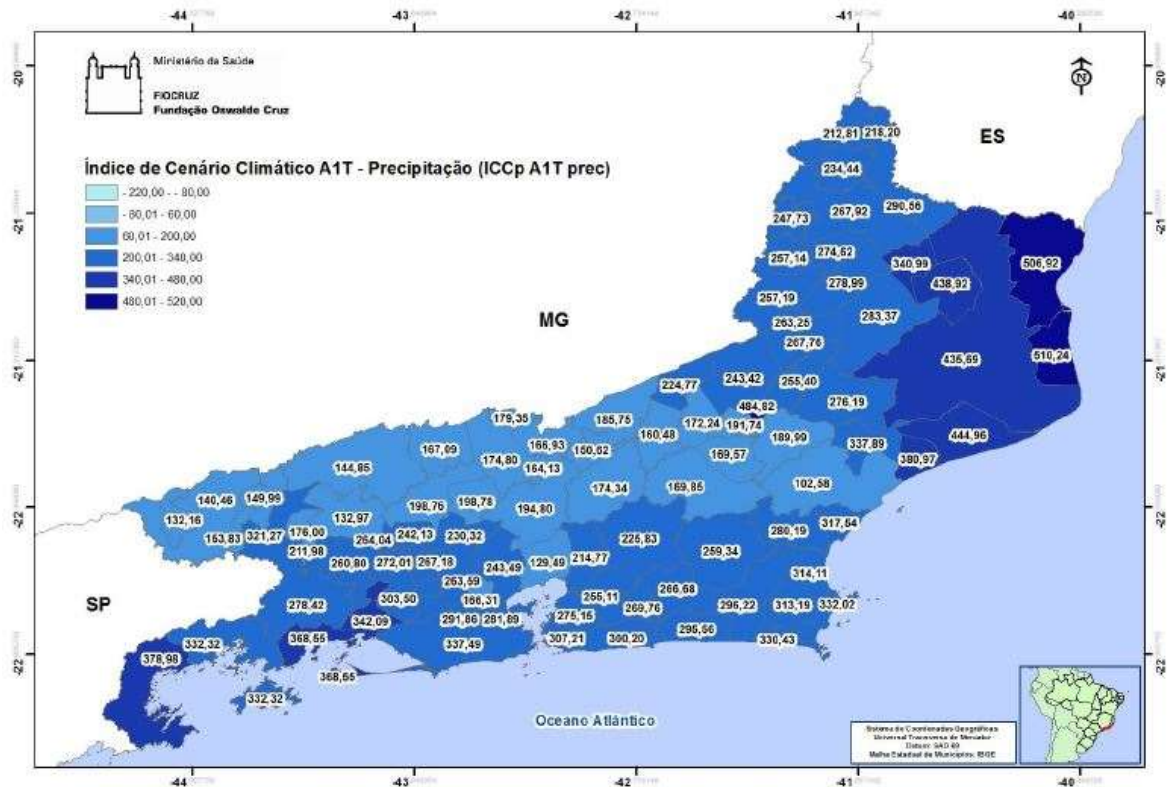
chuva associada a eventos de chuvas intensas vem aumentando nos últimos anos na região florestal do Rio de Janeiro. Projeta-se um aumento tanto na frequência de ocorrência quanto na quantidade de chuva associada a chuvas fortes até o final do Século 21, assim como períodos de seca mais longos e as estações chuvosas mais curtas.

Figura 23 – Índice de Cenário Climático relativo à precipitação para o cenário A1FI.



Fonte: Barata et al., 2014.

Figura 24 – Índice de Cenário Climático relativo à precipitação para o cenário A1T.



Fonte: Barata *et al.*, 2014.

A América do Sul tropical sofreu um rápido aquecimento nas últimas cinco décadas, tendência que deve continuar e aumentar até ao final do século XXI (CARVALHO e JONES, 2013 apud ZILLI *et al*, 2016). A redução na frequência de dias chuvosos ao longo da margem das zonas convectivas, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul, é uma das consequências da mudança na variabilidade espacial da umidade em uma atmosfera mais quente. A explicação se sustenta na teoria de que temperaturas mais elevadas aumentariam a pressão de vapor de saturação, aumentando a umidade necessária para se atingir a saturação (CHOU e NEELIN, 2004; HELD e SODEN, 2006; LINTNER e NEELIN, 2010; MA *et al.*, 2011 apud ZILLI *et al*, 2016).

Nesse sentido, parece haver um consenso científico em relação à tendência a ocorrência eventos de chuva mais intensos para a cidade do Rio de Janeiro (o que representa uma tendência a variação, mas não necessariamente da média, já que os períodos de seca também tendem a aumentar). No que tange a frequência, as informações ainda são controversas, sendo difícil mensurar qual estudo apresenta maior confiabilidade.

Em qualquer um dos casos, o problema é que eventos mais extremos passem a acontecer, superando o limite que o sistema urbano consegue lidar com eles. Diante disso, os efeitos das mudanças climáticas se manifestarão através do aumento da intensidade dos eventos de chuvas, o que interfere diretamente na referência de projetos de drenagem, que trabalham com eventos (e não com médias ou totais de precipitação anual).

Neste projeto, esse aumento será representado pelo aumento de 5% na intensidade das chuvas em cada cenário futuro, conforme proposto originalmente por Dong *et al.* (2017). Para reduzir o número de simulações foram considerados três cenários além do *baseline* (+5, +10 e +20%).

Além disso, o aumento do nível do mar e possíveis impactos no sistema de drenagem como o remanso provocado pelo sistema de comportas existente, estão sendo considerados nestes cenários. Porém, devido à consideração da comporta fechada (situação mais desfavorável), o aumento do nível do mar torna-se irrelevante em termos de estressar o sistema de drenagem. Mais à frente, serão demonstrados cenários de correção do sistema de comportas para aumento da capacidade hidráulica em que o efeito da variação do nível do mar será levado em consideração. Estes cenários servirão para analisar o que pode ser pior para o sistema de drenagem: o aumento do nível do mar, ou o dimensionamento e a operação inadequada das comportas.

4.1.2. Método de simulação de expansão da urbanização informal

Normalmente, associamos que ocupações em morros potencializam a ocorrência de deslizamentos de terra, enquanto ocupações em áreas alagáveis potencializam as inundações. Porém, também se observam os impactos causados por ocupações em morros e encostas nos eventos de inundação. Quando ocorrem deslizamentos nos mesmos eventos chuvosos que deflagram inundações, o que ocorre é um agravamento da criticidade da inundação, que terá o talvegue da bacia como linha receptora do material deslizado. Além disso, mesmo nos casos em que não ocorrem deslizamentos, as ocupações em cotas altas interferem de forma significativa no escoamento superficial, aumentando o coeficiente de *runoff* e reduzindo o tempo de concentração da bacia.

Na área de estudo, a falta de espaços livres na bacia hidrográfica dificulta a implementação de soluções para apoiar a recuperação do sistema de drenagem. Vale ressaltar

que a maioria desses espaços livres são encostas montanhosas localizadas a montante da bacia hidrográfica, dentro de áreas de proteção ambiental, o que dificulta sua utilização como reservatórios ou parques fluviais. Embora essas áreas sejam normalmente inadequadas para o desenvolvimento urbano, a tendência comum percebida no Rio de Janeiro de ocupar áreas semelhantes de alto risco pode levar a uma expansão da urbanização em direção a essa paisagem natural, o que poderia contribuir ainda mais para a geração de escoamento na bacia hidrográfica e agravar as inundações.

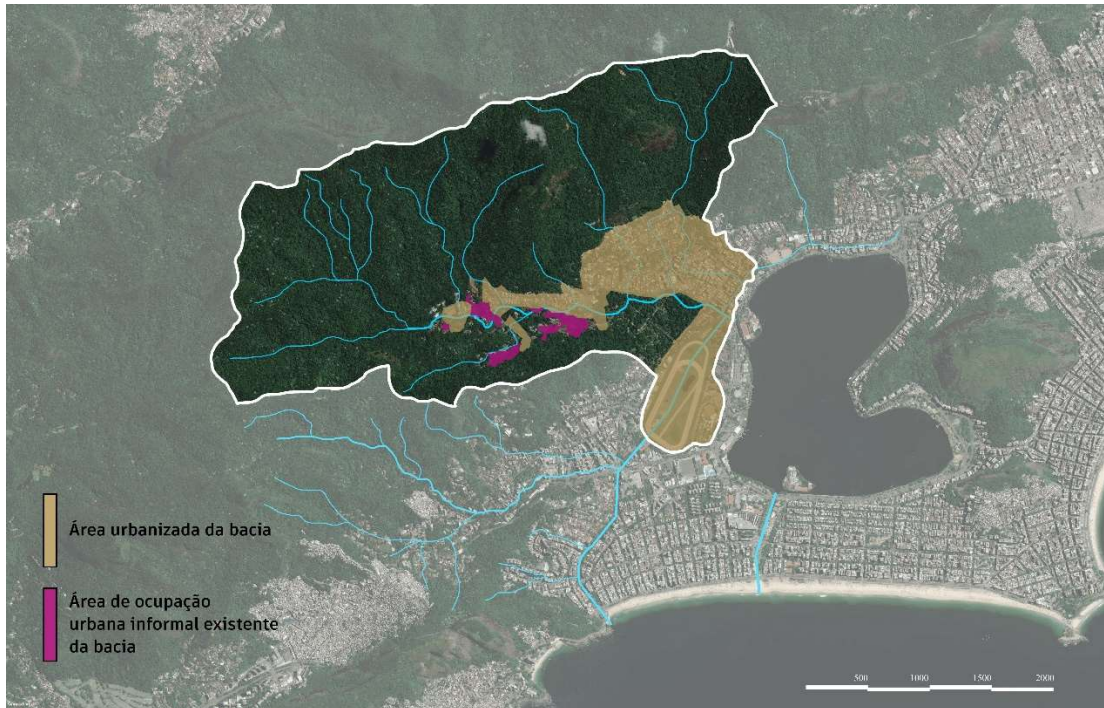
O método utilizado para simular os efeitos das ocupações informais na Bacia do Rio dos Macacos foi demarcar o máximo de ocupação possível nas encostas da bacia, limitada pela declividade de até 45°. Vale ressaltar que o objetivo da aplicação desse método é obter resultados quanto ao impacto da ocupação em encostas nas inundações, portanto simula uma realidade em que não há fiscalização das políticas de controle do uso e ocupação do solo, o que não é comum ocorrer, sobretudo em áreas valorizadas da cidade, como é o caso do bairro Jardim Botânico.

A ocupação máxima anteriormente mencionada corresponde ao cenário mais crítico. Esse cenário é propositalmente um cenário exagerado para efeitos sistemáticos de análise comparativa e corresponde ao aumento da área de ocupações informais em 8 vezes, ou seja, aumento de 800%. Para a simulação de cenários intermediários, foram considerados os aumentos de 200 e 400%.

- Área total da Bacia do Rio dos Macacos: 9,8km²
- Área de ocupação urbana formal na Bacia do Rio dos Macacos: 1,31km²
(13,37% da área total da bacia)
- Área de ocupação informal existente na Bacia do Rio dos Macacos: 0,10km²
(1,02% da área total da bacia).

A Figura 25 corresponde a mancha urbana do cenário atual, e a Figura 26 demonstra a área de expansão da ocupação informal simulada para a bacia no pior cenário (aumento de 800%).

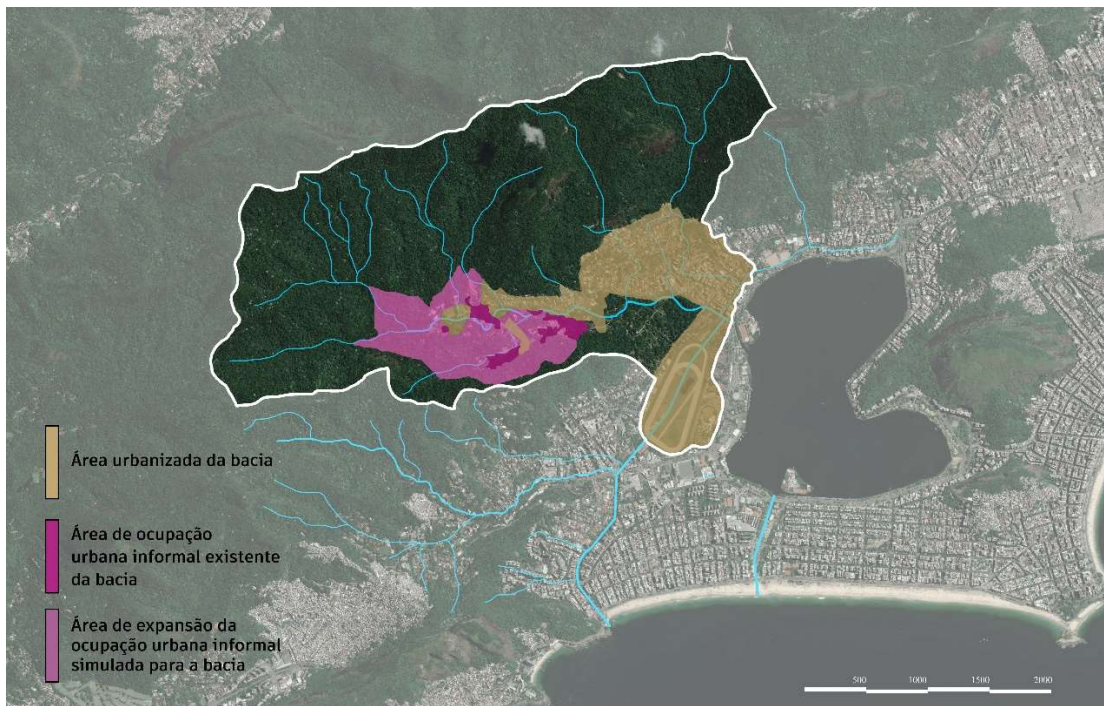
Figura 25 – Ocupação urbana atual da Bacia do Rio dos Macacos.



Fonte: Autora.

- Área de ocupação informal máxima simulada em cenários futuros na Bacia do Rio dos Macacos: 0,90km² (9,18% da área total da bacia) -expansão de 800%.

Figura 26 – Simulação da expansão máxima da urbanização informal da Bacia do Rio dos Macacos (cenário U800).



Fonte: Autora.

4.1.3. Método de mensuração da ameaça de inundações

Para mensuração da ameaça de inundações foi utilizado o software MODCEL, baseado na discretização do território em células de escoamento. O parâmetro adotado para medir e avaliar a ameaça de inundações foi a altura das lâminas de inundações nas regiões mais críticas do estudo de caso. Assim, será construído um modelo hidrodinâmico para obtenção dos resultados dos cenários de simulação de efeitos de mudanças climáticas e de expansão da urbanização. Um maior detalhamento da ferramenta utilizada nesta etapa metodológica pode ser visto no tópico a seguir.

4.2. FERRAMENTAS

4.2.1. Modelagem matemática de cheias

“As bacias de rios naturais, ou canalizados, em áreas urbanas, geralmente em áreas aproximadamente planas, tem potencial para formar grandes áreas alagáveis. Ao sair da rede de drenagem, o caminho da água pode ser qualquer, ditado pelos padrões de urbanização. Calçadas marginais tornam-se vertedouros para os rios, cujas águas extravasadas ao chegarem as ruas fazem destas verdadeiros canais, podendo alagar construções, parques ou praças, que então podem funcionar como reservatórios, indesejadamente, concentrando águas que não retomarão a rede de drenagem. Nessa situação, pode-se perceber que águas extravasadas podem ter comportamento independente da rede de drenagem, gerando seus próprios padrões de escoamento, especialmente, quando a microdrenagem não corresponde a função que dela se espera. Em um caso extremo, onde a microdrenagem não funcione, o que não é incomum, por falhas de manutenção e entupimentos, por exemplo, ou onde ela estiver sub-dimensionada, alagamentos em áreas urbanas podem-se iniciar mesmo sem extravasamento da rede de macrodrenagem, gerando também um padrão de escoamento particular e distinto daquele dos canais. Nesse contexto, percebe-se que há indicações para o uso do modelo de células. A representação do espaço urbano através de compartimentos homogêneos, que cobrem toda a superfície da bacia e faz toda ela se integrar e interagir em função do escoamento que sobre ela ocorre e algo que caminha ao encontro dos objetivos da modelação das enchentes urbanas. (MIGUEZ, 2001)”.

A correta modelagem matemática de uma enchente urbana, incluindo o escoamento superficial sobre solo urbano, pode ser uma importante ferramenta para embasar o desenvolvimento de um sistema geral de controle de cheias (MIGUEZ, 2001). O Modelo de

Células de Escoamento - MODCEL é um modelo hidrodinâmico que representa a paisagem urbana através do conceito de célula de escoamento. O *software* é capaz de representar o processo de transformação da chuva em vazão, calculando as respostas da bacia hidrográfica em termos de escoamentos superficiais. Esse modelo pode ser considerado como um modelo *quasi-2D* que simula inundações urbanas em uma rede de fluxo complexa que representa as interações entre rios, planícies, ruas e o sistema de drenagem usando conexões unidimensionais (SOUSA *et al.*, 2022).

As leis hidráulicas definidas entre as células são unidimensionais, no entanto, o modelo pode representar uma resposta de superfície bidimensional em uma malha espacial irregular. Portanto, a divisão da planície de inundação em células não usa elementos homogêneos - as células podem variar em forma e tamanho, adaptando-se para representar partes da área modelada. Contudo, não se trata de um processo arbitrário, pois utiliza limites naturais ou construídos, como estradas elevadas, diques, muros, edifícios e outras estruturas naturais ou construídas que introduzem particularidades locais nos padrões de escoamento. Ou seja, a superfície é representada por elementos 2D, com uma variedade de tipos de células e com suas próprias propriedades, ligadas por equações hidráulicas 1D.

A possibilidade da concepção de diferentes tipos de células dá flexibilidade ao modelo e permite a reprodução de diferentes padrões de escoamento. A adequada representação dos padrões de escoamento é fundamental para a obtenção de bons resultados neste tipo de modelagem, pois é o padrão definido que irá orientar as direções para as quais se escrevem as equações unidimensionais de escoamento (MIGUEZ, 2001). O MODCEL é baseado nos princípios básicos das leis de conservação de massa, conservação de energia e conservação de momento. Toda a bacia e seus diferentes elementos são representados por células, incluindo os rios, canais, planícies de inundação, áreas montanhosas, áreas urbanas, reservatórios e outras estruturas. Portanto, várias estruturas urbanas e padrões de fluxo podem ser simulados pela combinação de um conjunto pré-definido de tipos de células e ligações de células. As células atuam como os elementos de armazenamento do modelo, representando a elevação do terreno e as características de ocupação do solo, enquanto as ligações, por outro lado, ativam os fluxos entre cada par de células. Assim, células e ligações são os elementos básicos computacionais do MODCEL (MIGUEZ *et al.*, 2017).

Considerando esses aspectos, células individuais ou grupos de células podem representar adequadamente a dinâmica da água que pode ocorrer em paisagens naturais,

ambientes urbanos e rios, simulando o comportamento das águas de enchentes que passam pelas cidades. A equação de continuidade é aplicada a cada célula e a água que flui entre as células é representada por meio de leis hidráulicas bem estabelecidas, como a equação dinâmica de Saint-Venant para representar conexões de células em rios e canais e para escoamentos superficiais de ruas.

O modelo interpreta as bacias hidrográficas como um conjunto de compartimentos, representando os aspectos gerais da área modelada. Cada célula engloba um conjunto de informações, como declividade, cobertura e uso do solo, área total, área de armazenamento, coeficiente de escoamento superficial, entre outras. O MODCEL também é capaz de integrar a rede de microdrenagem, quando modelada, com a camada superficial do modelo.

A separação do escoamento superficial no MODCEL usa o coeficiente de escoamento, definido de acordo com a cobertura e uso do solo de cada célula. Um modelo que tenha capacidade para simular as cheias na bacia de forma espacializada e integrada, permitindo a avaliação das diversas interações existentes entre o sistema de drenagem e a superfície urbana é, portanto, a ferramenta mais adequada para simulação de cheias urbanas. Por esse motivo, no presente trabalho foi definida como ferramenta de modelagem, o Modelo de Células de Escoamento – MODCEL, desenvolvido na UFRJ, que tem como princípio a representação do espaço urbano através de compartimentos homogêneos, que cobrem toda a superfície da bacia e faz com que toda sua área se integre e interaja em função do escoamento que sobre ela ocorre (OLIVEIRA, 2018).

Para construir um modelo com maior confiabilidade, e que, portanto, represente melhor a realidade, devem ser obtidas a maior quantidade possível de dados relevantes para análise, como dados topográficos de terreno, dados batimétricos dos cursos d'água e cadastros das redes de drenagem existentes. A quantidade, qualidade e precisão destes dados levantados é diretamente proporcional ao nível de detalhamento que poderá ser alcançado pelo modelo para representar o comportamento hidrodinâmico da bacia.

Por fim, o MODCEL tem sido amplamente utilizado em estudos hidrológicos e ambientais, permitindo a simulação de eventos de cheias e de medidas de controle de inundações, produzindo resultados com boa precisão. Sua capacidade de simular o escoamento de cheias ao longo de um rio, planícies de inundação e áreas urbanas o torna uma ferramenta extremamente útil para o planejamento e a gestão de recursos hídricos, permitindo a avaliação

de medidas de controle de inundações e a previsão de enchentes em diferentes cenários, auxiliando os projetistas na tomada de decisões mais assertivas.

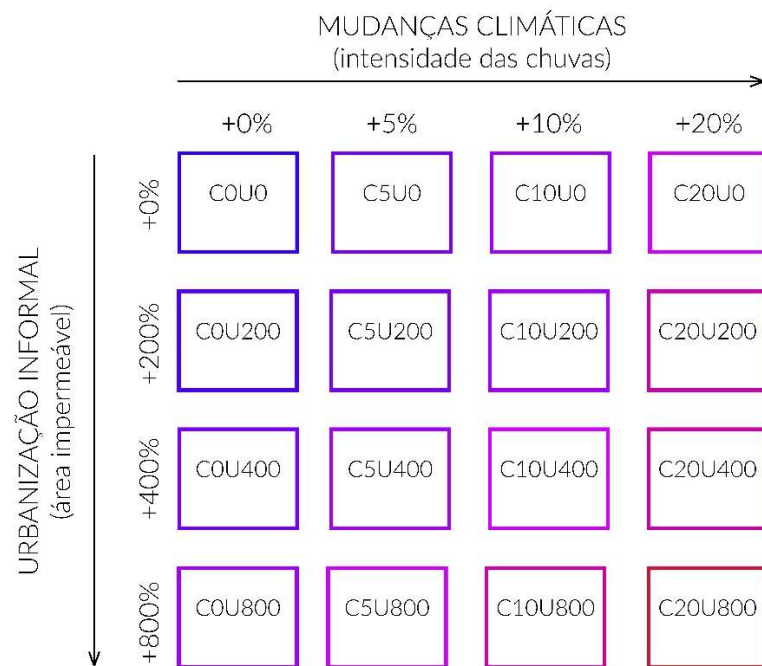
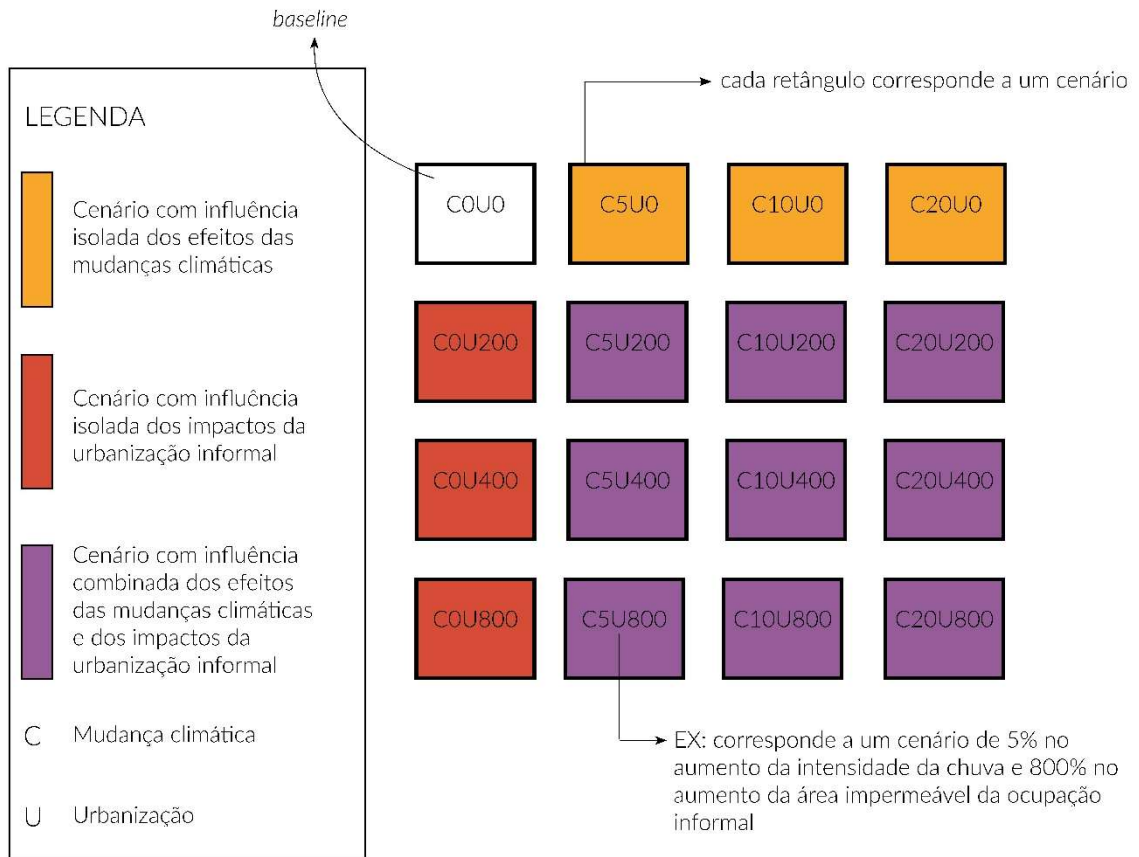
4.3. QUADRO METODOLÓGICO

A sequência de procedimentos metodológicos propostos por este trabalho, se dará, na prática, nas etapas descritas a seguir:

1. Analisar o comportamento hidrológico e hidrodinâmico da Bacia do Rio dos Macacos com uso de ferramenta computacional para modelagem matemática;
2. Fazer a simulação da modelagem hidrodinâmica para os cenários futuros detalhados a seguir, de forma isolada e combinada, através do seguinte método:
 - a. para a simulação de mudanças climáticas aumentar a intensidade das chuvas - *baseline* mais 3 cenários com acréscimo de 5, 10 e 20% em cada cenário respectivamente;
 - b. para simulação de incremento da urbanização expandir a ocupação informal nas encostas da bacia - *baseline* mais 3 cenários com acréscimo de 200, 400 e 800% em cada cenário respectivamente;
 - c. Simulação de cenário com correção estrutural da comporta no exutório do Rio dos Macacos (correção que possibilite sua abertura integral, garantindo a manutenção das dimensões do rio na foz) de maneira a identificar a melhoria hidráulica, bem como o possível efeito de sobre-elevação do nível do mar no sistema de drenagem.

A Figura 27 é uma representação gráfica da metodologia de simulação descrita na segunda fase do quadro metodológico.

Figura 27 – Diagrama da metodologia de simulação de cenários futuros.



Fonte: Autora.

3. Discussão dos resultados.

5. RESULTADOS

5.1. CONSTRUÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

A bacia do Rio dos Macacos é composta por uma complexa rede de escoamentos, que combina trechos de canal natural e artificial com galerias de drenagem. A parte mais baixa e plana da bacia conta com várias áreas que permitem armazenamentos temporários e escoamentos superficiais, formando redes secundárias e complementares ao próprio sistema de drenagem. Outro fator que aumenta a complexidade de funcionamento da rede de drenagem refere-se à possibilidade de transposição de parte da vazão entre os rios dos Macacos e Rainha, através do Canal do Jóquei. Há, ainda, ao menos em teoria, a interferência de maré na foz do sistema, que é interligada a Lagoa Rodrigo de Freitas através do Canal do Jardim de Alah (MIGUEZ *et al.*, 2012).

Nesse contexto, justifica-se a escolha do MODCEL como ferramenta de apoio ao diagnóstico de cheias. Como citado anteriormente, a utilização do MODCEL pressupõe a construção de uma rede bidimensional de escoamentos escritas nas diversas direções em que estes escoamentos podem ocorrer. A definição da rede de escoamentos, que se forma pela ação combinada da rede de drenagem e sua interação com a paisagem da bacia, é de fundamental importância para a modelagem, sendo crucial para o bom resultado do modelo a interpretação de padrões de escoamento, modelagem topográfica, hidráulico-hidrológica e topológica.

A construção do modelo hidrodinâmico é composta por duas etapas. A primeira consiste na utilização do Sistema de Informação Geográfica (GIS) para analisar características territoriais que afetem o ciclo hidrológico e o comportamento hidrodinâmico da bacia, desenvolvendo uma base de dados que serve como *input* na modelagem hidrodinâmica. A segunda etapa parte da simulação do modelo hidrológico-hidrodinâmico com a utilização do MODCEL, gerando a resposta da bacia hidrográfica para o evento pluviométrico simulado.

5.1.1 Sistema de Informações Geográficas

O *Quantum Geographic Information System* (QGIS) é um *software* livre e de código aberto que é utilizado para a análise, visualização e edição de dados geoespaciais. O programa oferece várias funções, como desenhar mapas de elevação, interpolação de dados, gerar curvas de nível e criar contornos de terreno. Também é possível gerenciar dados geográficos, visualizá-los na forma de planilhas de dados e modificá-los, alterando geometrias

e sistemas de projeção. Além disso, o QGIS é capaz de ler e editar dados vetoriais e *raster* de diferentes formatos ou dados de planilhas. O QGIS também permite a importação e exportação de outros formatos de arquivo com dados geospaciais e pode ser integrado a outras ferramentas e *softwares* de geoprocessamento. O QGIS pode ser utilizado em diversas áreas de atuação profissional, como planejamento urbano, gestão ambiental, agricultura, energia, entre outras. Por ser aberto, o QGIS tem uma comunidade ativa de usuários e desenvolvedores em todo o mundo, o que contribui para a constante melhoria e atualização do *software* (WING *et al.*, 2003).

Em linhas gerais, os processos a seguir compõem a estrutura de análise e levantamento de dados no QGIS para a caracterização da área alvo e diagnóstico da situação atual:

1. identificação dos principais cursos d'água;
2. análise da paisagem e cobertura do solo (topografia, áreas naturais de armazenamento de água);
3. análise do uso da terra (áreas urbanas formais e informais, identificação de áreas de proteção ambiental).

A Figura 28 demonstra alguns dos dados levantados no QGIS para a área de estudo.

Figura 28 – Sobreposição de informações obtidas em GIS para a Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas.

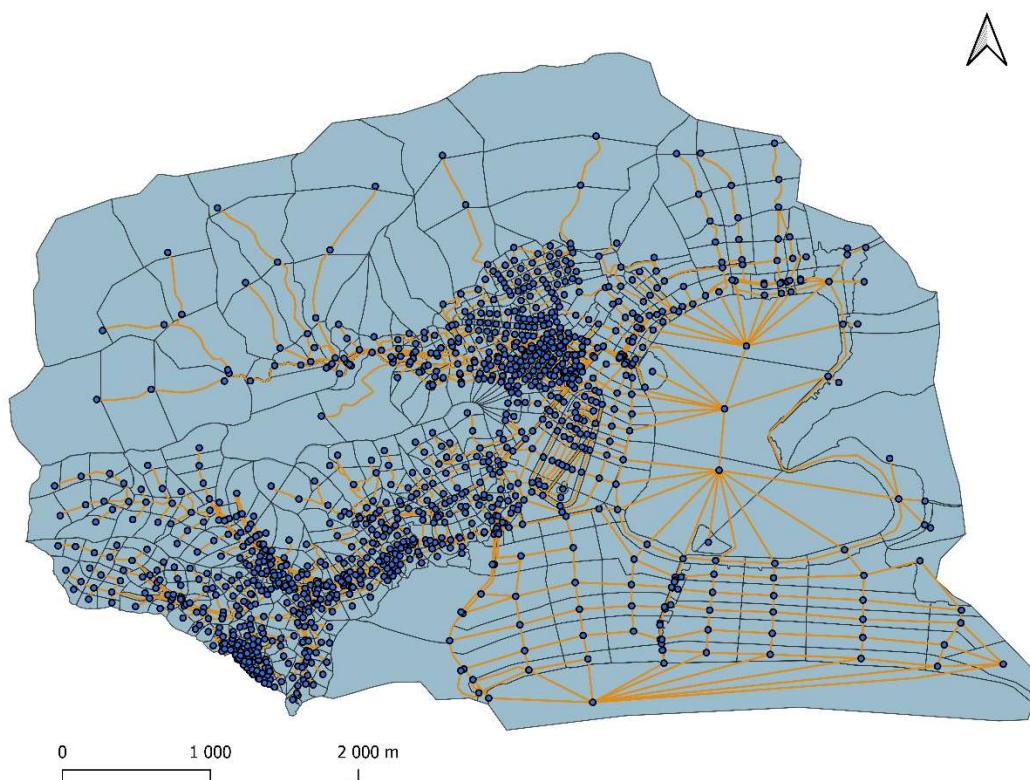


Fonte: Autora.

A partir dos dados levantados, foi possível fazer a separação de células de escoamento da área de estudo. Nesse processo, tomou-se como critério as dinâmicas da água sobre a área urbana. A divisão se deu em partes menores para a área de interesse, ou seja, na área que compreende o bairro Jardim Botânico e seu entorno imediato, onde seria importante obter resultados mais precisos.

No evento de chuva utilizado para a calibração do modelo ocorreu o extravasamento da lagoa, e, por esse motivo, o modelo contempla toda a Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas, para que fosse possível representar a realidade do evento o mais próxima possível do que ocorreu. Por esse motivo, foram adotadas simplificações na modelagem das áreas que compreendem os bairros Lagoa, Ipanema e Leblon ao passo que os bairros Jardim Botânico, Horto e Gávea foram mais bem detalhados. A escolha do evento de calibração, que será mostrado mais a frente neste capítulo, se justifica por ser um evento extremo recente em que foi possível fazer a coleta de dados em campo à época. Na Figura 29 é possível ver a divisão das células de escoamento.

Figura 29 – Divisão de células do modelo da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas.



Fonte: Autora.

6.1.2 MODCEL

A partir do modelo da divisão da Bacia do Rio dos Macacos de células desenvolvido originalmente pela autora e complementada por Takita e Câmara (2023), e, posteriormente, mais bem detalhada e calibrada por Pires e Oliva (2023), foram desenvolvidas uma série de análises e complementações na base de simulação, a fim de obter um modelo que representasse o mais próximo possível a realidade do sistema de macrodrenagem da bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas.

O MODCEL é capaz de representar estruturas hidráulicas e paisagens naturais ou urbanas, e as células do modelo são conectadas por relações hidráulicas que permitem a troca de vazões entre elas. As ligações mais comuns entre as células incluem canais, planícies, vertedouros, orifícios, galerias, bueiros, comportas e equações de cota e descarga.

Além das informações que são extraídas do GIS, é necessário alimentar a tabela de atributos de cada uma das células para que o modelo funcione. São acrescentadas ou alteradas manualmente informações como tipo de célula, coeficiente de *runoff*, cota de fundo, nível d'água, entre outras. A definição da cobertura e uso do solo para a bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas foi feita por meio da interpretação visual de imagens de satélite da região. Os valores de *runoff* (porcentagem de água que se torna escoamento superficial) listados abaixo foram considerados para a área de estudo de acordo com o manual de “instruções técnicas para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana” da Fundação Rio-Águas:

- 0,30 - Áreas com muita vegetação;
- 0,45 - Áreas edificadas contendo mais de 70% de vegetação;
- 0,70 - Áreas edificadas contendo aproximadamente 50% de vegetação;
- 0,75 - Áreas edificadas contendo aproximadamente 30% de vegetação;
- 0,85 - Áreas edificadas contendo menos de 10% de vegetação;
- 0,90 – Ruas e calçadas;
- 1,00 – Corpo hídrico.

6.1.2 Chuva de Calibração

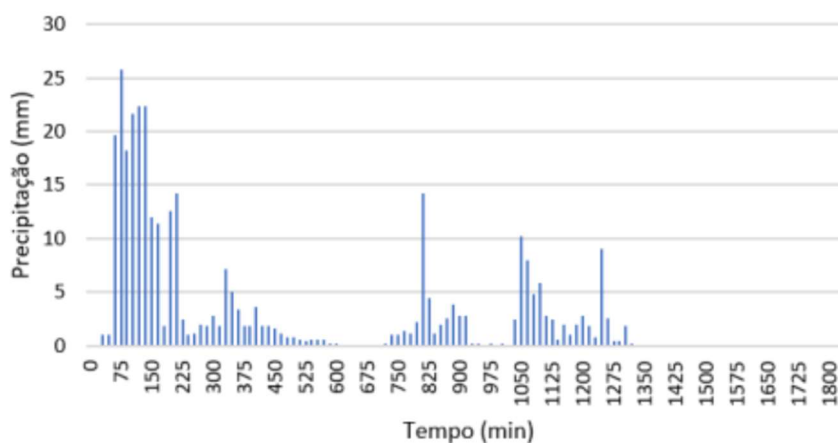
A modelagem hidrodinâmica é usada como uma ferramenta de apoio para simular as inundações onde um processo de calibração é conduzido para compatibilizar o comportamento

espacial da água no modelo com o que ocorre na realidade. O processo de modelagem considera a etapa calibração do modelo a partir de dados coletados e, posteriormente, a realização de um diagnóstico da dinâmica da água e dos processos de inundação na área modelada.

A calibração tem como objetivo verificar se o modelo é capaz de representar adequadamente o comportamento do fluxo e acúmulo superficial de água na área representada. A comparação entre os resultados do modelo e os dados observados em campo permitem identificar possíveis discrepâncias e ajustar o modelo para garantir uma representação mais próxima à realidade.

A etapa de calibração do modelo aqui apresentada é resultado do trabalho desenvolvido por Pires e Oliva (2023). Para realizar o processo de calibração do modelo hidrodinâmico foi escolhido o evento dos dias 8 e 9 de abril de 2019. O tempo de concentração da bacia calculado é de 70 minutos, e esse evento de chuva teve o tempo de recorrência (TR) de quase 130 anos, para o qual o sistema de macrodrenagem não foi projetado, e, portanto, falhou. Os dados da chuva foram coletados do banco de dados do site Alerta Rio, da Prefeitura do Rio de Janeiro. Na Figura 30 é possível ver o hietograma da chuva de calibração.

Figura 30 – Hietograma da chuva dos dias 8 e 9 de abril de 2019.



Fonte: Pires e Oliva (2023).

6.1.3 Chuva de Projeto

O método utilizado para determinação da curva e equação intensidade-duração-frequência (IDF) foi a distribuição de Gumbel, que estima as precipitações máximas de acordo com um tempo de recorrência e uma duração de chuva específica. Para a construção da equação

IDF foram analisados os dados pluviométricos dos postos da Rocinha e Jardim Botânico. O posto da Rocinha está localizado na Estrada da Gávea, número 242, possui 27 anos de dados pluviométricos para intervalos de 15 minutos entre o período de 1997 até o momento atual. Já o posto Jardim Botânico, está localizado no Jockey Club Brasileiro, na Rua Jardim Botânico, número 1003, e é uma estação remota que realiza a leitura e transmissão automáticas de dados. Este posto possui 27 anos com dados pluviométricos para intervalos de 15 minutos entre o período de 1997 até o momento atual. Devido a quantidade de dados disponíveis, e por se tratar de informações recentes que representam o regime pluviométrico local com maior precisão, optou-se pela utilização da distribuição de Gumbel para novas equações IDF - ao invés de utilizar equações disponíveis em fontes oficiais, como da Fundação Rio-Águas. As equações construídas para o estudo de chuvas intensas estão representadas na Equação 1 para a Rocinha e na Equação 2 para o Jardim Botânico.

Equação 1

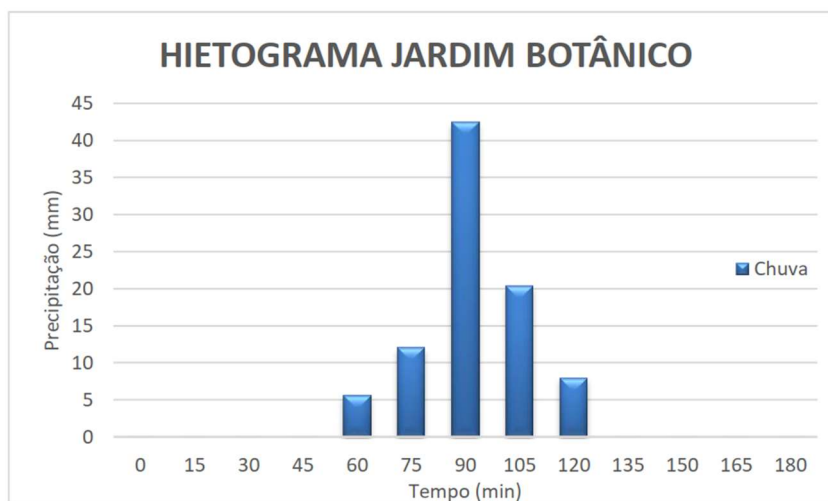
$$i = \frac{5.196,73 \cdot TR^{0,0561}}{(t + 24,7)^{1,004677}}$$

Equação 2

$$i = \frac{5.798,91 \cdot TR^{0,0628}}{(t + 27,4)^{0,995861}}$$

Após a definição dos parâmetros da equação IDF, foram calculadas as chuvas de projeto considerando o TR de 25 anos relativo ao dimensionamento e verificação do sistema de macrodrenagem adotada pela legislação brasileira, e a duração da chuva de 70 minutos que corresponde ao tempo de concentração da Bacia do Rio dos Macacos (MIGUEZ *et al.*, 2012). A consideração da duração da chuva igual ao tempo de concentração consiste em uma premissa que garante uma maior contribuição dos escoamentos superficiais nas proximidades do exultório da bacia hidrográfica. O hietograma da chuva de projeto com TR de 25 anos, pode ser visto na Figura 31.

Figura 31 – Hietograma da chuva de projeto para TR25 no Jardim Botânico.



Fonte: Autora.

5.2. RESULTADO DO CENÁRIO ATUAL

Este trabalho propõe cenários que consideram o sistema estressado sob influências isoladas e combinadas de efeitos adversos das mudanças climáticas e da expansão urbana irregular sobre o sistema de drenagem. Essas possibilidades foram simuladas usando o cenário atual (*baseline*) como referência. O cenário de referência representa a situação atual e foi adotado para a calibração do modelo hidrodinâmico usando dados reais. As áreas inundadas do modelo se mostraram condizentes com a realidade das inundações da bacia estudada, validando a calibração do modelo. No cenário *baseline* é possível visualizar a extensão da área inundada no modelo para o Tempo de Retorno de 25 anos do estudo de caso. O objetivo dessa simulação é compreender quais regiões inundam, e a altura da lâmina de inundação de cada área.

A partir do resultado do modelo hidrodinâmico da Bacia Lagoa Rodrigo de Freitas é possível identificar alguns aspectos que caracterizam o padrão de inundações da área de estudo. O primeiro deles, é que o bairro Jardim Botânico possui a maior concentração de áreas inundadas e com lâminas de inundação altas, onde várias células responderam com lâminas de alturas superiores a 0,50m. O ponto mais crítico da bacia está situado na Rua Jardim Botânico, apresentando altura de 1,11m. Essa área possui grande contribuição dos escoamentos do Rio dos Macacos, que é o principal afluente da bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas.

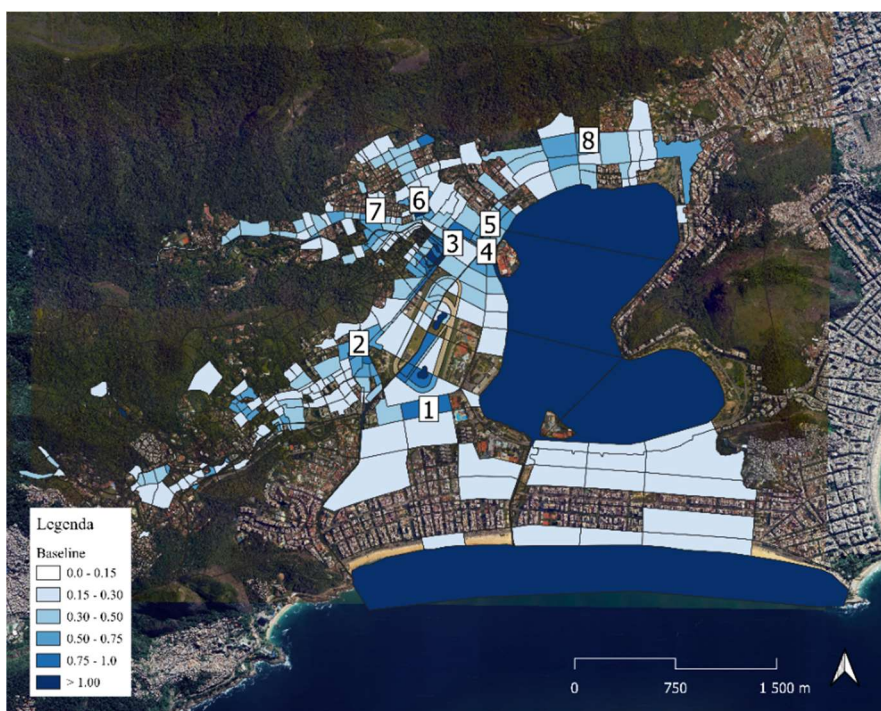
Para a análise, foi adotada uma simplificação, em que lâminas de inundação com altura inferior a 0,15m foram consideradas não significativas, uma vez que não afetam os pedestres e não apresentam perigo significativo para os veículos, considerando que a altura de meio-fio

Os pontos mais críticos de inundação identificados a partir do modelo foram:

1. Rua Mario Ribeiro na altura do Hospital Miguel Couto; -ref célula n° 2628 – lâmina 0,84m
2. Baixo Gávea – Rua Major Rubens Vaz, Rua José Roberto Macedo Soares, Rua Quintino Cunha, Praça Santos Dumont, Av. Bartolomeu Mitre; -ref célula n° 3749 – lâmina 0,87m
3. Rua Jardim Botânico entre a Associação de Amigos do Jardim Botânico e a Rua Lopes Quintas; -ref célula n° 2333 – lâmina 1,11m
4. Rua General Garzon; -ref célula n° 2612 – lâmina 0,76m
5. Avenida Lineu de Paula Machado entre a Rua General Garzón e a Rua Saturnino de Brito; -ref célula n° 2588 – lâmina 0,59m
6. Rua Von Martius; -ref célula n° 2273 – lâmina 1,06m
7. Rua Pacheco Leão - entre o número 650 e a Rua Jardim Botânico; -ref célula n° 2225 – lâmina 0,91m
8. Rua Jardim Botânico entre o Parque Lage e o número 143; -ref célula n° 4357 – lâmina 0,70m.

Na Figura 34 é possível ver as manchas de inundação resultantes do processo de simulação bem como a localização dos pontos críticos da bacia listados e numerados acima.

Figura 34 – Mapa de pontos de referência de áreas inundadas numerados de 1 a 8.



Fonte: Autora.

5.3. RESULTADOS DOS CENÁRIOS FUTUROS

5.3.1. Cenários de efeitos adversos das mudanças climáticas

Os efeitos da mudança climática foram representados por um aumento na intensidade das chuvas. A maioria dos estudos que visam prospectar mudanças climáticas na cidade do Rio de Janeiro indica que os eventos de precipitação provavelmente se intensificarão, embora também mostrem que a frequência e a precipitação total anual provavelmente diminuirão (BARATA *et al.*, 2014; DERECHYNSKI, *et al.*, 2013; ZILLI *et al.*, 2016). Assim, este estudo considera a intensificação dos eventos das chuvas como uma das principais consequências da mudança climática, que é representada por um aumento percentual da chuva projetada.

Outra tendência climática para a cidade do Rio de Janeiro é que ocorra o aumento do NMM, podendo ter um acréscimo de até 1,00m de acordo com os cenários mais pessimistas projetados pelo IPCC (IPCC, 2023). No caso do bairro Jardim Botânico e adjacências, esse aumento não influencia nos resultados, uma vez que há uma ruptura na ligação do Rio dos Macacos com a Lagoa Rodrigo de Freitas devido a existência de uma comporta em uma seção final do canal da Rua General Garzón que se encontra constantemente fechada. Essa barreira impede que haja interação entre o Rio dos Macaco e a Lagoa, fazendo com que as mudanças de nível do mar ou de maré não interfiram diretamente nessa bacia. Sendo assim, mesmo o aumento do NMM tendo sido considerado nos cenários de mudanças climáticas, seu impacto nos resultados de inundações locais é nulo. Por esse motivo, os cenários que representam as mudanças climáticas são representados pelo aumento da intensidade das chuvas considerando o funcionamento da infraestrutura de drenagem atual. Mais adiante, neste trabalho, serão apresentados os resultados associados a abertura da comporta.

No Quadro 5 é possível visualizar a precipitação para intervalos de 15 minutos para cada cenário, tendo o cenário C0 como o cenário atual que é representado pela chuva de projeto de TR 25 anos. Os cenários C5, C10 e C20 são correspondentes aos acréscimos na intensidade da chuva de 5, 10 e 20%, respectivamente.

Quadro 5 – Precipitação acumulada em intervalos de 15 minutos para as chuvas com acréscimo de intensidade para os cenários C5, C10 e C20 referentes aos efeitos adversos das mudanças climáticas.

	C0	C5	C10	C20
	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0
	5.6	5.9	6.2	6.7
	12.0	12.6	13.2	14.4
	42.5	44.6	46.8	51.0
	20.4	21.4	22.4	24.5
	7.9	8.3	8.7	9.5
	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0

Fonte: Autora.

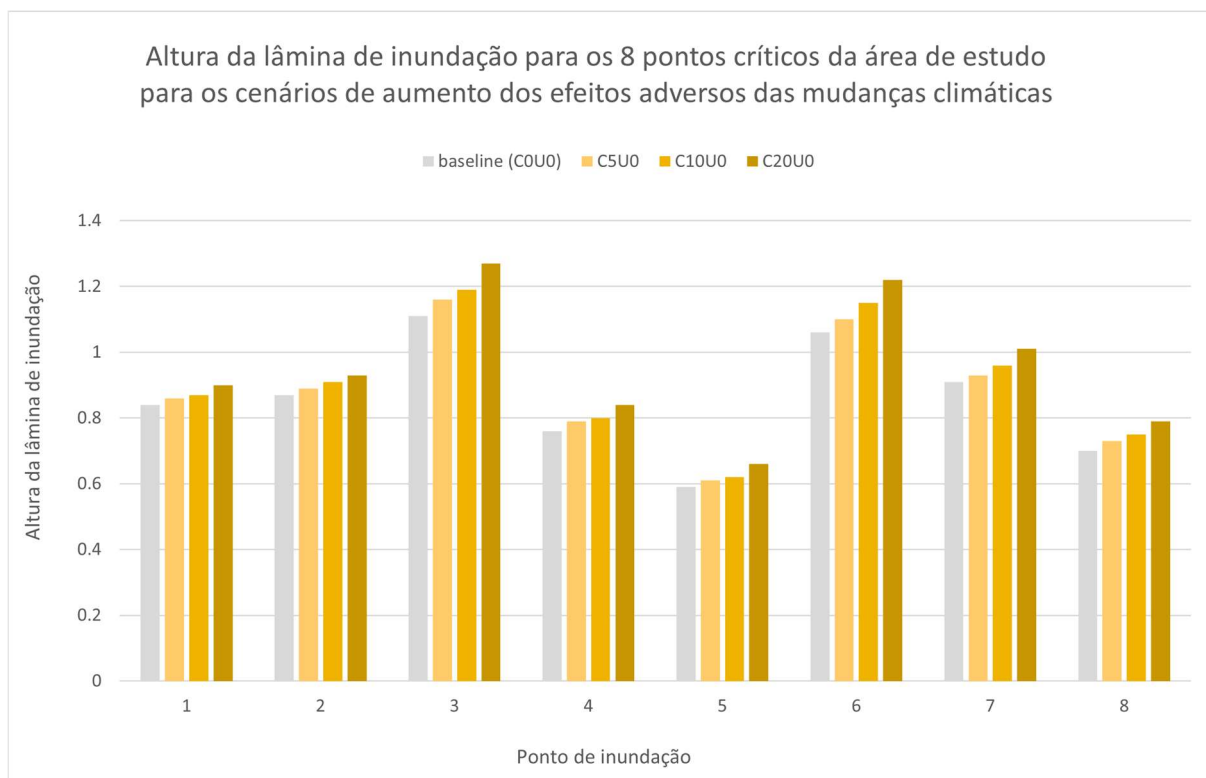
Os resultados dos modelos gerados a partir do incremento da chuva de projeto estão demonstrados no Tabela 3. Na Figura 35 é possível visualizar os resultados da Tabela 3 em gráfico.

Tabela 3 – Altura da lâmina de inundação para os pontos críticos da bacia para os cenários do eixo estressor de mudanças climáticas.

CENÁRIO C0U0			CENÁRIO C5U0			CENÁRIO C10U0			CENÁRIO C20U0		
Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina
1	2628	0.84	1	2628	0.86	1	2628	0.87	1	2628	0.9
2	3749	0.87	2	3749	0.89	2	3749	0.91	2	3749	0.93
3	2333	1.11	3	2333	1.16	3	2333	1.19	3	2333	1.27
4	2612	0.76	4	2612	0.79	4	2612	0.8	4	2612	0.84
5	2588	0.59	5	2588	0.61	5	2588	0.62	5	2588	0.66
6	2273	1.06	6	2273	1.1	6	2273	1.15	6	2273	1.22
7	2225	0.91	7	2225	0.93	7	2225	0.96	7	2225	1.01
8	4357	0.7	8	4357	0.73	8	4357	0.75	8	4357	0.79

Fonte: Autora.

Figura 35 – Altura da lâmina de inundação para os 8 pontos críticos da área de estudo para os cenários de aumento dos efeitos adversos das mudanças climáticas



Fonte: Autora.

A partir dos resultados obtidos para os cenários de incremento da intensidade da chuva, é possível fazer algumas conclusões:

1. As mudanças climáticas afetam todas as células inundadas do modelo, portanto, todo o território da área urbana modelada;
2. É possível estabelecer uma correlação direta entre a intensidade da chuva e as extensões das inundações para a área modelada;
3. O ponto 3, localizado na Rua Jardim Botânico, é o ponto mais crítico no cenário *baseline* e o ponto em que as inundações são mais agravadas em todos os cenários, apresentando aumento da altura da lâmina de 0,87m do cenário atual para 1,27m (cerca de +46%) no cenário mais crítico (C20U0);
4. O ponto 6, localizado na Rua Von Martius, é o segundo ponto mais crítico da bacia onde as inundações apresentam lâminas superiores a 1,00m para todos os cenários;
5. Os pontos 2, 3 e 8 estão situadas em uma importante via de conexão entre a Zona Sul e Oeste da cidade, a Rua Jardim Botânico. O ponto 4 abrange um trecho da Avenida Borges de Medeiros, que é uma via arterial da autoestrada Lagoa-Barra. Esses quatro pontos apresentam altura de inundações superior a 0,70m para todos os cenários simulados, sinalizando uma forte tendência a ocorrência de uma ruptura no funcionamento da rede de transportes da cidade em episódios de chuvas mais intensas. Quando um importante eixo viário é obstruído, os riscos associados às inundações tornam-se difusos, podendo gerar consequências

negativas para diversos setores e populações que não necessariamente estão presentes na área afetada. Além disso, as operações de resgate da população que é diretamente afetada são dificultadas devido as limitações de acesso ao local.

5.3.2. Cenários de expansão da urbanização informal

Para simular a expansão das áreas urbanas, foi considerada a ocupação das encostas da bacia hidrográfica, simulando a expansão da urbanização informal já existente. Esse processo simulará um crescimento urbano não controlado, ou desordenado. Para atingir esse objetivo, foi adotado um aumento do coeficiente de *runoff* para toda a área que corresponde a representação da expansão urbana. Esse número foi baseado no escoamento observado nas áreas de urbanização informal existente no cenário *baseline* - ou seja, a área de urbanização informal mais densa existente, já em formato consolidado, foi tomada como referência para inferir a situação futura de uma ocupação desordenada nas encostas da bacia hidrográfica. Os resultados gerados a partir do aumento da urbanização estão demonstrados no Tabela 4.

Tabela 4 – Altura da lâmina de inundação para os pontos críticos da bacia para os cenários do eixo estressor de expansão da urbanização informal.

CENÁRIO C0U0			CENÁRIO C0U200			CENÁRIO C0U400			CENÁRIO C0U800		
Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina
1	2628	0.84	1	2628	0.84	1	2628	0.84	1	2628	0.84
2	3749	0.87	2	3749	0.88	2	3749	0.88	2	3749	0.88
3	2333	1.11	3	2333	1.16	3	2333	1.22	3	2333	1.31
4	2612	0.76	4	2612	0.77	4	2612	0.79	4	2612	0.81
5	2588	0.59	5	2588	0.6	5	2588	0.61	5	2588	0.63
6	2273	1.06	6	2273	1.06	6	2273	1.06	6	2273	1.06
7	2225	0.91	7	2225	0.91	7	2225	0.92	7	2225	0.92
8	4357	0.7	8	4357	0.7	8	4357	0.7	8	4357	0.7

Fonte: Autora.

Os resultados obtidos para os cenários de simulação de expansão da urbanização na área de estudo levaram as seguintes conclusões:

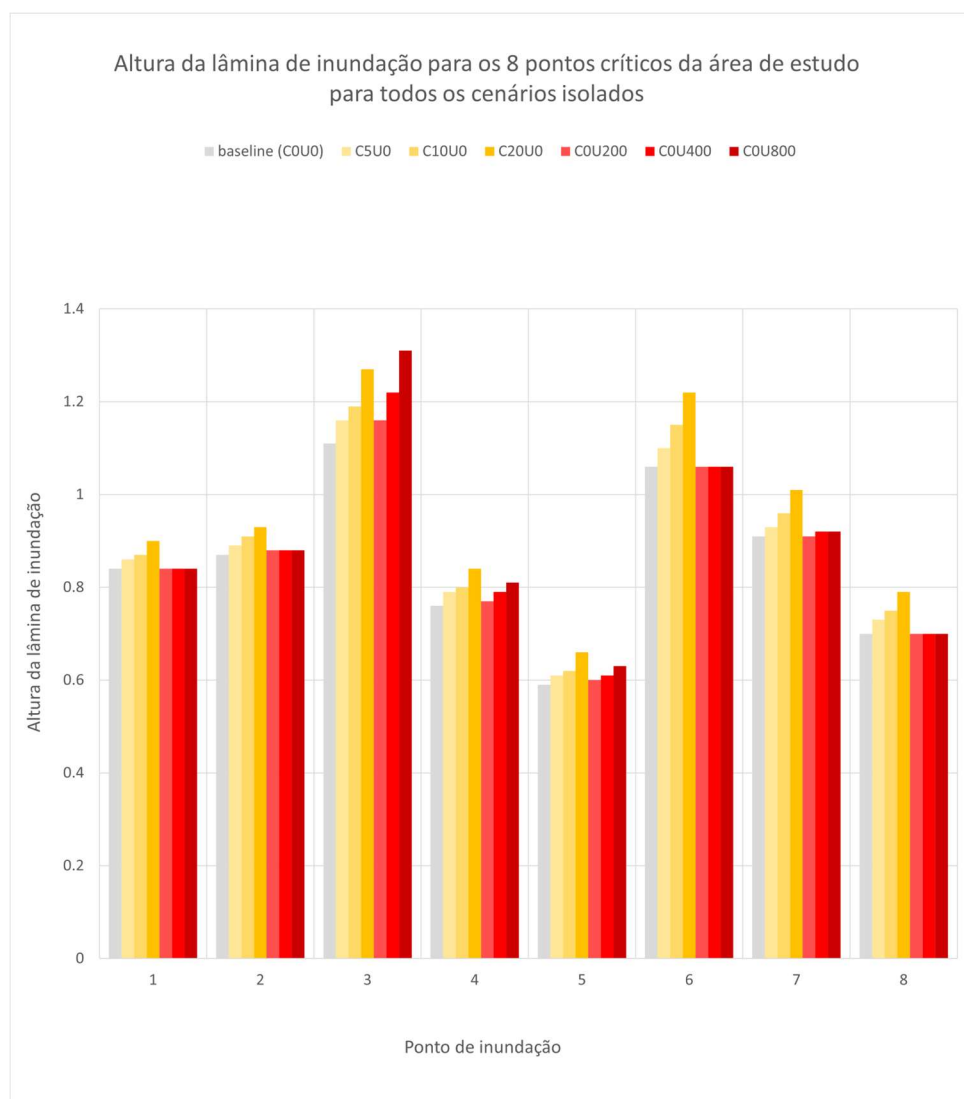
1. O ponto mais crítico da bacia (ponto 3), apresentou resultado de lâmina de inundação maiores para os dois cenários mais críticos de cada eixo estressor, demonstrando que o impacto da urbanização sobre o solo urbano apresenta uma ameaça maior, em termos aumento do risco de inundações, quando comparada aos efeitos das mudanças climáticas. Note-se que estes resultados de inundação se referem a uma mudança de uso do solo de apenas parte de uma bacia com urbanização já consolidada em seus trechos médio e inferior. Mesmo assim, quando este resultado é comparado com uma intensificação da chuva sobre toda a bacia, os alagamentos resultantes advindos de uma urbanização não controlada são

um pouco maiores. Este reconhecimento lança luz sobre uma responsabilidade atual e premente, que recai sobre o adequado planejamento e desenvolvimento urbano, com preocupações sustentáveis.

- Os pontos 1, 2, 6, 7 e 8 permaneceram-se inalterados em todos os cenários. Isso se deve ao fato de que área de expansão da urbanização se configurou dentro de uma sub-bacia de contribuição de escoamentos superficiais apenas nas áreas adjacentes ao eixo do Rio dos Macacos e, portanto, não tem a mesma abrangência territorial da avaliação anterior feita para mudanças climáticas, em que a chuva distribuída sobre toda a área sofre um acréscimo.

Na Figura 36 é possível visualizar o gráfico com comparação das alturas das lâminas de inundação para os 8 pontos críticos da área de estudo tanto para os cenários de aumento dos efeitos adversos das mudanças climáticas quanto para os cenários de expansão da urbanização.

Figura 36 - Altura da lâmina de inundação para os 8 pontos críticos da área de estudo para todos os cenários.



Fonte: Autora.

5.3.3. Cenários combinados e isolados de expansão da urbanização informal e efeitos adversos das mudanças climáticas

Os cenários combinados são aqueles que consideram o sistema adversamente afetado tanto pelos efeitos das mudanças climáticas, quanto pela expansão da urbanização informal. Na Tabela 5 e Figura 37 possível observar os resultados de todos os cenários simulados.

Tabela 5 – Altura da lâmina de inundação para os pontos críticos da bacia para todos os cenários simulados.

CENÁRIO C0U0			CENÁRIO C5U0			CENÁRIO C10U0			CENÁRIO C20U0		
Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina
1	2628	0.84	1	2628	0.86	1	2628	0.87	1	2628	0.9
2	3749	0.87	2	3749	0.89	2	3749	0.91	2	3749	0.93
3	2333	1.11	3	2333	1.16	3	2333	1.19	3	2333	1.27
4	2612	0.76	4	2612	0.79	4	2612	0.8	4	2612	0.84
5	2588	0.59	5	2588	0.61	5	2588	0.62	5	2588	0.66
6	2273	1.06	6	2273	1.1	6	2273	1.15	6	2273	1.22
7	2225	0.91	7	2225	0.93	7	2225	0.96	7	2225	1.01
8	4357	0.7	8	4357	0.73	8	4357	0.75	8	4357	0.79

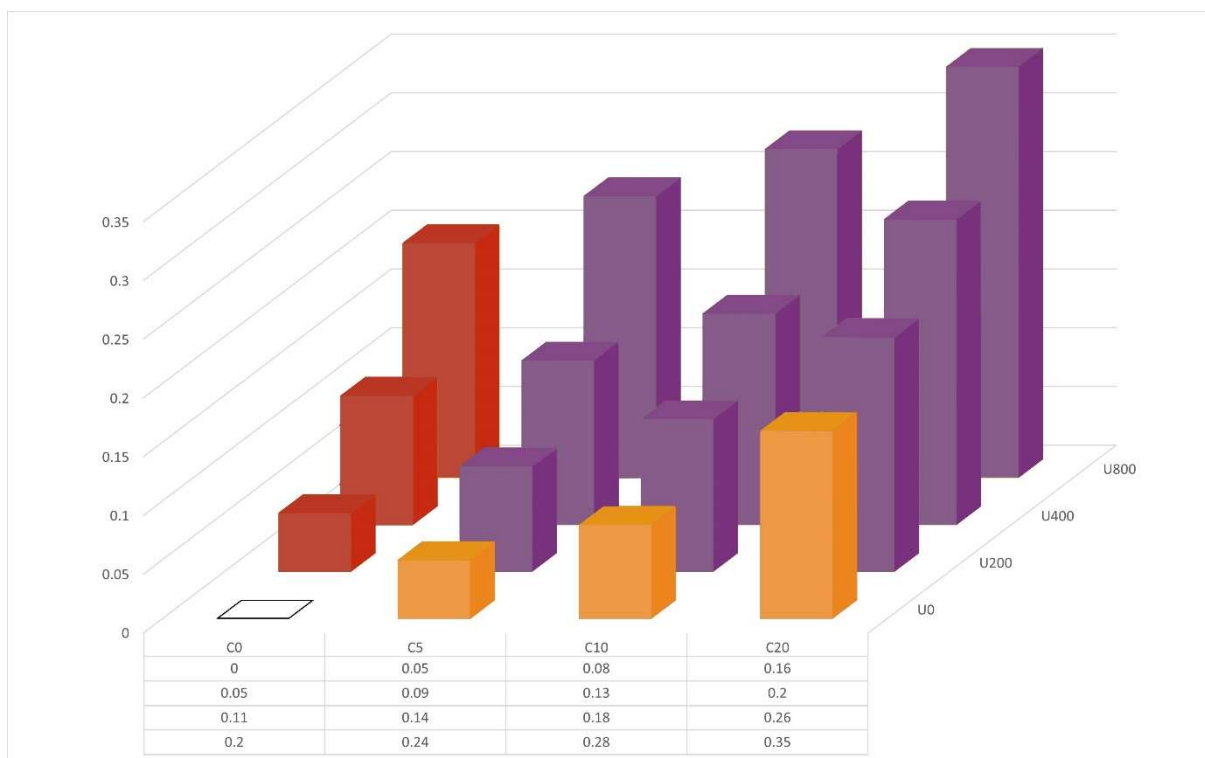
CENÁRIO C0U200			CENÁRIO C5U200			CENÁRIO C10U200			CENÁRIO C20U200		
Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina
1	2628	0.84	1	2628	0.86	1	2628	0.87	1	2628	0.9
2	3749	0.88	2	3749	0.89	2	3749	0.9	2	3749	0.93
3	2333	1.16	3	2333	1.2	3	2333	1.24	3	2333	1.31
4	2612	0.77	4	2612	0.79	4	2612	0.81	4	2612	0.85
5	2588	0.6	5	2588	0.61	5	2588	0.63	5	2588	0.66
6	2273	1.06	6	2273	1.1	6	2273	1.15	6	2273	1.22
7	2225	0.91	7	2225	0.94	7	2225	0.96	7	2225	1.01
8	4357	0.7	8	4357	0.73	8	4357	0.75	8	4357	0.79

CENÁRIO C0U400			CENÁRIO C5U400			CENÁRIO C10U400			CENÁRIO C20U400		
Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina
1	2628	0.84	1	2628	0.86	1	2628	0.87	1	2628	0.9
2	3749	0.88	2	3749	0.89	2	3749	0.9	2	3749	0.93
3	2333	1.22	3	2333	1.25	3	2333	1.29	3	2333	1.37
4	2612	0.79	4	2612	0.81	4	2612	0.82	4	2612	0.86
5	2588	0.61	5	2588	0.62	5	2588	0.64	5	2588	0.67
6	2273	1.06	6	2273	1.1	6	2273	1.15	6	2273	1.22
7	2225	0.92	7	2225	0.94	7	2225	0.96	7	2225	1.01
8	4357	0.7	8	4357	0.73	8	4357	0.75	8	4357	0.79

CENÁRIO C0U800			CENÁRIO C5U800			CENÁRIO C10U800			CENÁRIO C20U800		
Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina
1	2628	0.84	1	2628	0.86	1	2628	0.87	1	2628	0.9
2	3749	0.88	2	3749	0.9	2	3749	0.91	2	3749	0.94
3	2333	1.31	3	2333	1.35	3	2333	1.39	3	2333	1.46
4	2612	0.81	4	2612	0.83	4	2612	0.85	4	2612	0.88
5	2588	0.63	5	2588	0.65	5	2588	0.66	5	2588	0.69
6	2273	1.06	6	2273	1.1	6	2273	1.15	6	2273	1.22
7	2225	0.92	7	2225	0.94	7	2225	0.97	7	2225	1.01
8	4357	0.7	8	4357	0.73	8	4357	0.75	8	4357	0.79

Fonte: Autora.

Figura 37 - Incremento da altura da lâmina de inundação no ponto 3 da bacia (Rua Jardim Botânico) para todos os cenários de simulação.



Fonte: Autora.

A análise dos resultados de todos os cenários levou às considerações descritas a seguir:

- O ponto 3 (Rua Jardim Botânico) foi identificado como o ponto mais crítico e mais suscetível a aumento da altura da lâmina de inundação, tanto para os cenários de aumento das mudanças climáticas quanto para os cenários de aumento da urbanização informal;
- Os cenários que simulam os impactos das mudanças climáticas demonstraram impacto generalizado no agravamento de inundações, porém, para o ponto mais crítico da bacia (3), onde a mudança de uso do solo simulada ocorreu a montante, os efeitos da urbanização foram mais prejudiciais, devido ao fato de que a expansão considerada para favelas está inserida em uma sub-bacia que contribui para a inundação desse ponto;
- Para os cenários de aumento da urbanização informal, apenas os pontos 3, 4 e 5 apresentaram aumento significativo da altura de lâmina de inundação (a diferença menor que 2cm foi considerada não significativa);
- Para os cenários de aumento da intensidade da chuva decorrente das mudanças climáticas, todos os pontos da bacia apresentaram aumento da altura da lâmina de inundação, sendo estes mais significativo nos pontos 3 e 6, situados próximos aos cursos do Rio dos Macacos e Rio Algodão, respectivamente.

5.3.4. Cenários com correção da comporta

É possível concluir que o sistema de drenagem da área de estudo como se encontra hoje é insuficiente para conduzir os escoamentos pluviais e evitar as inundações diante de chuvas mais intensas (mesmo considerando o TR25 anos para o qual deveria funcionar sem falhas). A partir da análise do cenário atual foi possível chegar ao diagnóstico de que não apenas há uma obsolescência da infraestrutura, mas que, também, é factível afirmar que há um subdimensionamento no sistema desde a sua concepção, uma vez que as inundações no bairro Jardim Botânico são recorrentes e ocorrem há muito tempo de acordo com os registros históricos da área. Ainda, é possível considerar uma falha de operação latente, que compromete o bom funcionamento da rede de drenagem existente. A hipótese aqui considerada, é que a barreira imposta pela comporta da Rua General Garzón favorece o agravamento das inundações ao impedir a interação do Rio dos Macacos com a Lagoa Rodrigo de Freitas. O obstáculo criado pela comporta no curso hídrico reduz a sua capacidade hidráulica. Em resposta, se observa uma sobre-elevação do nível de superfície livre, que se manifesta a montante do local de implementação da comporta. Este fenômeno é denominado remanso hidráulico. Vale destacar que o remanso hidráulico ocorre de maneira natural pelo nível de água de restrição gerado pelo corpo hídrico receptor (neste caso a Lagoa Rodrigo de Freitas), porém, é agravado pela comporta uma vez que ela se encontra acima do nível médio da Lagoa.

Os cursos d'água têm seu escoamento governado por forças de gravidade e na sua condição natural o escoamento ocorre livremente. Variações de nível e velocidades são atribuídas principalmente a mudanças nas seções transversais, no fundo do canal, ou às características de rugosidade do leito e das margens. Eventualmente, algumas estruturas hidráulicas podem interferir no escoamento do rio. Quando existente, essa interferência é percebida sob a consequência na forma de uma sobre-elevação do nível de superfície livre (nível d'água) de forma abrupta no entorno da estrutura hidráulica. A principal causa deste efeito é uma redução drástica na velocidade do curso hídrico do ponto de barramento. Sem velocidade, e diante de uma obstrução que impede o escoamento, ocorre um aumento da seção transversal fazendo com que a água tenha uma elevação em altura com o aumento da profundidade do nível d'água do sistema.

No caso da área de estudo, as comportas funcionam como estruturas hidráulicas de barramento nas situações que se encontram fechadas, provocando o remanso. A bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas inclui os Rios Cabeça, Macacos e Rainha e possui

três comportas. O manejo das comportas que compõem o sistema lagunar, localizadas nos canais do Jardim de Alah, Avenida Visconde de Albuquerque e Rua General Garzón, visam garantir simultaneamente a qualidade ambiental da Lagoa e a balneabilidade das praias de Ipanema e Leblon. A Figura 38 mostra a localização das comportas.

Figura 38 – Recorte da Bacia Hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas com a localização das comportas e elevatória operadas pela Rio-Águas.



Legenda:

- Comporta Jardim de Alah
- Comporta Visconde de Albuquerque
- Comporta General Garzon
- Elevatória Visconde de Albuquerque

Fonte: Plano de Contingências e Monitoramento da Lagoa Rodrigo de Freitas, Rio-Águas (2010).

O padrão normal de operação destas comportas é descrito a seguir:

- A comporta localizada no final do canal da Avenida Visconde de Albuquerque, em tempo seco serve como barreira ao deságue na praia do Leblon, sendo a água do canal direcionada para a elevatória da Visconde de Albuquerque que recalca para o sistema da concessionária de esgoto (emissário de Ipanema). Em dias de chuva a comporta é aberta, promovendo o deságue do Rio Rainha no mar;
- A comporta localizada na Rua General Garzón tem como objetivo evitar o deságue em tempo seco dos Rios Cabeça e Macacos na Lagoa Rodrigo de Freitas. Teoricamente,

sua abertura ocorre em ocasiões de chuva e está associada à abertura da comporta da Avenida Visconde de Albuquerque, o que evita o fluxo do Rio Rainha para a Lagoa.

- A comporta localizada na foz do canal do Jardim de Alah, junto às praias de Ipanema e Leblon. Este canal possui 800m de comprimento e entre 10 e 18 metros de largura, sendo a única ligação direta da Lagoa com o mar. A operação da comporta do Jardim de Alah está vinculada ao controle do nível da coluna d'água da Lagoa e aos níveis de maré.

Nas Figuras 39 e 40 são representadas a operação das comportas da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas em tempo seco e na ocorrência de chuvas, respectivamente.

Figura 39 – Funcionamento operacional das comportas da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas em tempo seco.



Fonte: Plano de Contingências e Monitoramento da Lagoa Rodrigo de Freitas, Rio-Águas (2010).

Figura 40 – Funcionamento operacional das comportas da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas durante as chuvas.



Fonte: Plano de Contingências e Monitoramento da Lagoa Rodrigo de Freitas, Rio-Águas (2010).

Em síntese, para o regime de tempo seco não há entrada de água pelo canal da Rua General Garzón e a água segue para a elevatória da Visconde de Albuquerque. Já no regime de chuvas há entrada de água pelo canal da Rua General Garzón na Lagoa e saída de água para o mar pelo Canal da Visconde de Albuquerque. O fluxo dos canais pode ser alterado em função da altura das ondas e intensidade das marés. Além de gerar a sobre-elevação do nível de água a montante da comporta da Rua General Garzón, que secciona o Rio dos Macacos, a comporta fechada impede que haja interação do Rio dos Macacos com a Lagoa Rodrigo de Freitas.

Vale destacar que a operação destas comportas ocorre de forma manual e não há um protocolo estabelecido para sua abertura em função do volume ou intensidade dos eventos pluviométricos. Desta forma, considerar que a comporta da Rua General Garzón (mais relevante para as inundações do Jardim Botânico) poderá se encontrar fechada em um evento crítico pode ser considerado um cenário plausível e a favor da segurança. Adicionalmente, mesmo aberta, a estrutura da comporta ainda gera uma restrição hidráulica significativa uma vez que é possível apenas a abertura da estrutura central conforme pode ser visto na Figura 41.

Figura 41 – Comporta da Rua General Garzón em situação aberta.



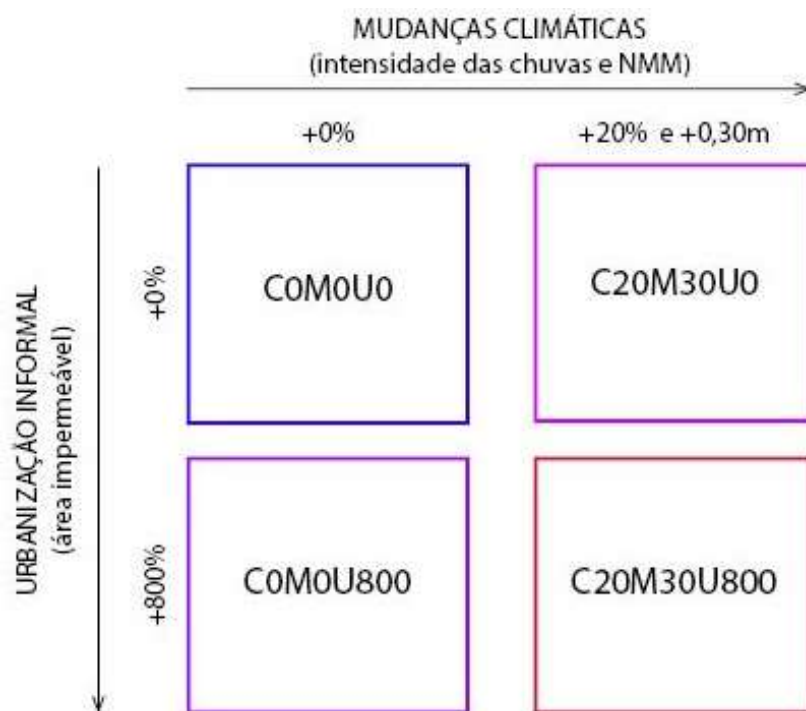
Fonte: Acervo dos autores.

Dessa maneira, a consideração de um cenário de comporta fechada da Rua General Garzón faz com que o aumento do nível do mar seja irrelevante na área de impacto direto do Rio dos Macacos, onde se situa o bairro Jardim Botânico – exceto em eventos extremos em que ocorre o transbordamento da lagoa e essa interação se torne inevitável. Em contrapartida, essa área sofre com o agravamento das inundações devido ao remanso hidráulico provocado pela infraestrutura durante a ocorrência de eventos menos extremos e de maior probabilidade de ocorrência. Nesse sentido, nos cenários de mudanças climáticas o aumento do NMM do mar estava sendo considerado, mas seu efeito para uma chuva de tempo de recorrência de 25 anos é nulo.

Para efeito de simulação da correção do sistema de drenagem foram elaborados cenários de reestruturação da comporta, sendo possível sua abertura integral (mantendo a capacidade hidráulica do Rio dos Macacos na Rua General Garzón) e considerando o aumento do nível do mar em 0,30m (cenário M30). Para esses cenários, só foram considerados os cenários de simulação extremos de mudanças climáticas e urbanização, ou seja, o cenário C20M30U0 sendo o mais extremo do eixo estressor das mudanças climáticas; o cenário C0M0U800 sendo o mais extremo do eixo estressor dos impactos do aumento da urbanização, em que os efeitos

das mudanças climáticas tanto no aumento da intensidade das chuvas quanto no aumento do NMM são desconsiderados; e o cenário C20M30U800 em que os efeitos adversos mais extremos de ambos os estressores são somados consolidando o pior cenário. A Figura 42 é um diagrama esquemático dos cenários de simulação propostos com correção da comporta.

Figura 42 – Diagrama de cenários de simulação com correção da comporta.



Fonte: Autora.

Primeiramente, foi feita a análise comparativa dos resultados do cenário atual (C0U0) e o cenário em que não são adicionados estressores de mudanças climáticas e urbanização, apenas a correção hidráulica e abertura da comporta (C0M0U0). Essa primeira análise foi feita com o intuito de validar ou refutar a hipótese anteriormente levantada de que o remanso decorrente do fechamento da comporta provoca o aumento no nível d'água a montante e contribui para o agravamento das inundações. No MODCEL, a abertura e correção da comporta foi representada pela alteração do tipo de ligação da última célula do canal da Rua General Garzón com a Lagoa, passando de uma equação de vertimento para a equação de Saint-Venant (escoamento em superfície livre). Na Tabela 6 é possível observar esses resultados.

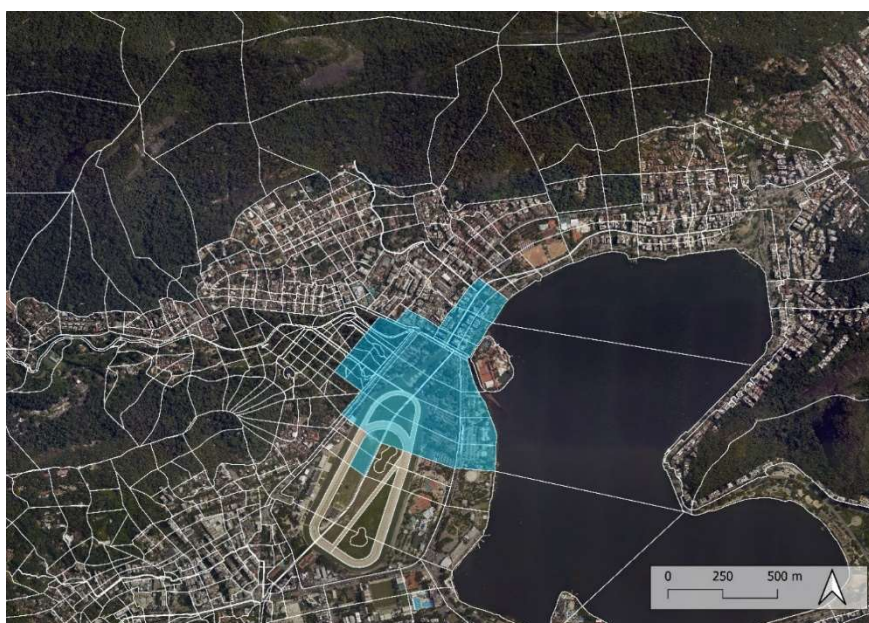
Tabela 6 – Altura da lâmina de inundação para os pontos críticos da bacia para os cenários C0U0 (comporta fechada) e C0M0U0 (comporta aberta com correção da seção hidráulica).

CENÁRIO C0U0			CENÁRIO C0M0U0		
Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina
1	2628	0.84	1	2628	0.84
2	3749	0.87	2	3749	0.87
3	2333	1.11	3	2333	1.09
4	2612	0.76	4	2612	0.25
5	2588	0.59	5	2588	0.11
6	2273	1.06	6	2273	1.06
7	2225	0.91	7	2225	0.91
8	4357	0.7	8	4357	0.7

Fonte: Autora.

Os resultados observados demonstram que a abertura e correção da comporta resulta em uma redução significativa da lâmina de inundação dos pontos críticos mais próximos a área da comporta, apresentando diminuição da altura da lâmina em 0,51m no ponto 4 (-67%), e 0,48m no ponto 5 (-81%). Esse resultado comprova que o remanso gerado pela presença da comporta fechada é um fator agravante de inundações para a área de entorno da Rua General Garzón. Através da análise das lâminas de inundação dos cenários C0U0 e C0M0U0, foi possível delimitar com maior precisão a área que é influenciada em termos de aumento de inundações devido ao efeito do remanso. A Figura 43 demonstra a delimitação dessa área.

Figura 43 – Área com lâmina de inundação reduzida a partir da abertura da comporta e correção da seção hidráulica do Rio dos Macacos no trecho da Rua General Garzón.



Fonte: Autora.

Nas Tabelas 7 e 8 estão respectivamente os resultados para cenários de comporta fechada sem considerar o aumento do nível do mar, e cenários de comporta aberta e corrigida, para efeito de comparação.

Tabela 7 – Altura da lâmina de inundação nos pontos críticos da bacia para os cenários C0U0, C20U0, C0U800 e C20U800.

CENÁRIO C0U0			CENÁRIO C20U0			CENÁRIO C0U800			CENÁRIO C20U800		
Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina	Ref	Célula	H lâmina
1	2628	0.84	1	2628	0.9	1	2628	0.84	1	2628	0.9
2	3749	0.87	2	3749	0.93	2	3749	0.88	2	3749	0.94
3	2333	1.11	3	2333	1.27	3	2333	1.31	3	2333	1.46
4	2612	0.76	4	2612	0.84	4	2612	0.81	4	2612	0.88
5	2588	0.59	5	2588	0.66	5	2588	0.63	5	2588	0.69
6	2273	1.06	6	2273	1.22	6	2273	1.06	6	2273	1.22
7	2225	0.91	7	2225	1.01	7	2225	0.92	7	2225	1.01
8	4357	0.7	8	4357	0.79	8	4357	0.7	8	4357	0.79

Fonte: Autora.

Tabela 8 – Altura da lâmina de inundação nos pontos críticos da bacia para os cenários C0M0U0 (cenário atual com comporta aberta); C20M30U0 (cenário de comporta aberta sob os estresses das mudanças climáticas – aumento da intensidade das chuvas em 20% e aumento do NMM em 0,30m); C0M0U800 (cenário de comporta aberta com aumento da urbanização informal em 800%); C20M30U800 (cenário de comporta aberta sob os estresses das mudanças climáticas e expansão da urbanização informal simultaneamente).

CENÁRIO C0M0U0			CENÁRIO C20M30U0			CENÁRIO C0M0U800			CENÁRIO C20M30U800		
Ref.	Célula	H lâmina	Ref.	Célula	H lâmina	Ref.	Célula	H lâmina	Ref.	Célula	H lâmina
1	2628	0.84	1	2628	0.9	1	2628	0.84	1	2628	0.9
2	3749	0.87	2	3749	0.93	2	3749	0.88	2	3749	0.93
3	2333	1.09	3	2333	1.25	3	2333	1.29	3	2333	1.44
4	2612	0.25	4	2612	0.32	4	2612	0.29	4	2612	0.37
5	2588	0.11	5	2588	0.22	5	2588	0.16	5	2588	0.27
6	2273	1.06	6	2273	1.22	6	2273	1.06	6	2273	1.22
7	2225	0.91	7	2225	1.01	7	2225	0.92	7	2225	1.01
8	4357	0.7	8	4357	0.79	8	4357	0.7	8	4357	0.79

Fonte: Autora.

A análise dos resultados de todos os cenários levou às considerações descritas a seguir:

- Quando comparados os resultados dos cenários C20U0 e C20M30U0, o cenário em que se considera o aumento do NMM em 0,30m com correção da comporta apresenta lâminas com alturas menores ou iguais comparadas ao cenário sem aumento do NMM e comporta fechada, para todos os pontos críticos da bacia. Esse resultado demonstra que a operação inadequada da comporta e subdimensionamento da seção hidráulica

são mais nocivos para o sistema de drenagem da área de estudo do que o aumento do NMM;

- Há uma redução expressiva da altura da lâmina inundação nos pontos 4 e 5 – que são os pontos mais próximos a comporta. No ponto 4, a lâmina de inundação passou de 0,76m no cenário atual para 0,25m (-67%), no cenário COM0U0 – cenário atual com correção da comporta e no ponto 5 houve uma redução de 0,59m para 0,11m (-78%). Para os demais pontos da bacia não se observou diferença significativa;
- As lâminas de inundação dos pontos 1, 7 e 8 – que são os pontos mais distantes da comporta –, permaneceram inalteradas tanto para os cenários de comporta fechada quanto para os de comporta corrigida, indicando que sua abertura e correção não tem influência sobre toda a extensão territorial da bacia, apenas em seu entorno imediato.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A principal contribuição deste estudo é gerar uma melhor compreensão dos fatores de influência no agravamento de inundações urbanas, comparando os impactos da expansão urbana descontrolada e das mudanças climáticas no escoamento hidrológico e no volume de enchentes em um contexto urbano. Em particular, foram levadas em consideração as incertezas dos cenários futuros de urbanização e mudanças climáticas, empregando simulações de modelos para períodos indefinidos.

Os objetivos postulados inicialmente neste trabalho convergiam para o desenvolvimento de uma análise comparativa entre os efeitos adversos das mudanças climáticas e da expansão da urbanização, a fim de obtenção de resultados matemáticos a partir de um trabalho prático desenvolvido para a Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas, no Rio de Janeiro. Para tal, foi desenvolvido um referencial teórico sobre os principais assuntos relacionados ao tema do trabalho, inclusive com sustentação teórica que auxiliasse na definição de prospecções de tendências de aumento da intensidade das chuvas e aumento do nível do mar. No caso dos cenários simulados de aumento da área urbanizada, foi delimitada uma mancha de expansão urbana fictícia para a área de estudo baseada nos padrões de urbanização informal observada. Todos os grupos de cenários desenvolvidos a partir dos dois eixos estressores foram submetidos a modelagem matemática para obtenção dos resultados pretendidos. Nesse sentido, os objetivos gerais e específicos propostos pelo trabalho foram alcançados.

Há, no entanto, algumas limitações a serem consideradas, associadas a metodologia do trabalho. A modelagem hidrodinâmica procura reproduzir o escoamento superficial da área de estudo e, por concepção, as células de um modelo hidrodinâmico possuem dimensões variadas e fazem uma representação espacial de uma rede de escoamentos, com dada capacidade de armazenagem, que pode mostrar como o acúmulo de água se dá no território. No processo de modelagem, há uma subjetividade a ser considerada, associada a divisão de células para representação do território e sistema de drenagem no modelo, que fica a cargo do modelador. Modeladores diferentes podem obter resultados diferentes, embora a inércia resultante do processo determinístico de interpretação física, que considera toda a bacia interagindo, tende a gerar consistência entre as diferentes respostas. Para o modelo em questão, o traçado urbano e a topografia foram os balizadores na repartição das células, porém, algumas áreas foram mais bem detalhadas do que outras, para atingir melhores níveis de precisão, como é o caso do bairro Jardim Botânico. Nesse sentido, existe uma limitação quanto a precisão da extensão e geometria

das manchas de inundações, já que a modelagem adota algumas simplificações espaciais. Outro ponto de consideração é o fato de que a rede de microdrenagem não foi considerada na modelagem, o que também compromete os níveis de precisão quanto a altura das lâminas de inundação, especialmente em níveis mais baixos, ainda que o modelo tenha sido calibrado e validado, a partir da compatibilização com dados reais demonstrando satisfatória confiabilidade. De fato, porém, é a qualidade da calibração que garante a confiabilidade das respostas simuladas.

Há também limitações associadas às incertezas intrínsecas relacionadas à própria ideiação do trabalho, que procura simular cenários futuros adversos de efeitos das mudanças climáticas e expansão da urbanização – ambos processos de difícil previsão. O principal limitador é o fator tempo que não pode ser definido, ou seja, não há como estabelecer uma equivalência de tempo entre os processos de aumento dos efeitos negativos das mudanças climáticas sobre a intensidade das chuvas e aumento do nível do mar, e nem do processo de expansão da urbanização informal. A elaboração de cenários intermediários conjugados foi uma forma de considerar essa incerteza. Porém, como o presente trabalho não pretende, efetivamente, gerar cenários futuros de planejamento (sobre os quais, certamente, recairia uma responsabilidade maior), mas sim trazer para discussão um tema que parece hoje não está recebendo a atenção necessária, qual seja a importância do planejamento urbano frente aos problemas de inundação, essa incerteza foi considerada aceitável.

Cabe ressaltar, também, que neste trabalho a expansão da urbanização foi simulada para fins metodológicos de comparação, uma vez que há uma probabilidade muito baixa de que ocorra a expansão da urbanização na magnitude que foi simulada, uma vez que o Jardim Botânico é um bairro nobre da cidade do Rio de Janeiro em que a fiscalização por parte do poder público se dá de forma mais ativa. O limitador da mancha de urbanização acrescida foi a declividade das encostas, que foram limitadas a 45° – o que configura, na prática, outra limitação inerente à simulação proposta, já que não foram consideradas outras condicionantes importantes como o tipo de solo e cobertura que possibilitem a urbanização dessas áreas.

A hipótese explorada de que o impacto causado pela expansão da ocupação informal no aumento da magnitude das inundações é significativo frente às consequências das mudanças climáticas foi comprovada. Os resultados demonstram que o acelerado processo de expansão da área urbana impermeável é identificado como significativa fonte causadora de desequilíbrios no sistema urbano, no que tange a ocorrência de inundações, e assim deve ser igualmente

considerada, uma vez que a gestão do território é factível, é uma questão do presente e constitui uma preocupação passível de tratamento, sobre a qual se pode atuar efetivamente. Destaca-se que a mudança de uso do solo proposta, com o crescimento de uma ocupação informal, em uma área específica de montante, ocupando apenas uma fração da área da bacia, foi capaz de gerar, nas áreas a jusante desta modificação, um incremento de inundações pior que aquele advindo do aumento das chuvas intensas, que ocorre distribuídamente, de forma homogênea, sobre todo o território, mostrando a relevância deste processo.

As consequências dessa rápida urbanização, em termos de potencializar inundações urbanas, apontam para a necessidade de se pensar em cidades mais resilientes e pautadas no desenvolvimento sustentável, de forma que, através do planejamento urbano, seja possível garantir a capacidade de resistir aos choques de crescimento populacional e a eventos climáticos extremos, já que um estressor não anula o outro e ambos são imprevisíveis.

Os cenários com correção da comporta demonstraram que sua operação inadequada pode ser ainda pior para o sistema de drenagem do que o aumento do nível do mar. O efeito do remanso é comparável a pressão de um mar artificial sobre o sistema. Isso é outra consideração importante. O aumento do nível do mar pode efetivamente diminuir a capacidade do sistema, mas um sistema mal operado (e mal mantido) pode ter consequências absolutamente significativas já no presente.

Os resultados obtidos alertam para a urgência da adequação da infraestrutura de forma a que o sistema de drenagem da área de estudo seja atualizado para resistir aos impactos derivados de chuvas mais intensas, uma vez que hoje não se encontra em estado adequado nem mesmo para resistir a chuvas de proporções não-atípicas, o que justifica a alta suscetibilidade do sistema a falhar. A obsolescência do sistema de drenagem junto ao seu notável subdimensionamento resulta em inundações recorrentes para o cenário atual, demonstrando ser uma infraestrutura que não é a prova de falhas e, tampouco, segura para falhar. No futuro, quando suscetível às manifestações dos estressores, é certo afirmar que essas inundações se agravarão contribuindo para o aumento do risco da população exposta. Essa situação mostra a importância de políticas públicas de planejamento e controle do solo urbano alinhadas com as políticas de saneamento básico.

A contribuição dessa pesquisa vai ao encontro da discussão sobre a sustentabilidade e a resiliência urbana, fornecendo resultados práticos de cenários futuros adversos de inundações

para a Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas, que poderão nortear a elaboração do projeto para a adequação da infraestrutura de drenagem, mostrando que o adequado controle de uso do solo e a correta concepção, operação e manutenção de sistemas de drenagem são fundamentais para a mitigação do problema de inundações. A partir da metodologia aplicada para diagnóstico de inundações em diferentes cenários futuros, será possível colaborar no desenvolvimento de projetos de drenagem, bem como no planejamento urbano e na tomada de decisões, e, desta forma, contribuir para a redução de inundações sob a perspectiva de longo prazo. A metodologia desenvolvida poderá ser aplicada a outros estudos de caso. Mais aplicações, em bacias diferentes, poderão ainda ajudar a constituir um painel mais consistente sobre as importâncias relativas de cada estressor.

Outro ponto a ser destacado é a importância da atuação das políticas de planejamento urbano em consonância com o projeto de drenagem, alertando para a importância das políticas públicas associadas ao controle do uso do solo, que é determinante na geração de escoamento superficial. Além disso, deve-se evitar que ocupações urbanas se consolidem em áreas inadequadas para a construção, preservando a população da exposição ao risco. O direito à cidade e o direito à moradia segura devem ser direitos de todos. Ainda que isso não aconteça na prática, é necessário unir esforços para que se torne uma realidade, com participação ativa da população, dos tomadores de decisão, e, inclusive, com contribuição da academia na correta informação, no engajamento e na prestação de assistência técnica à comunidade.

6.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se que sejam elaborados projetos para a redução de inundações na área de estudo, e sejam submetidos ao cálculo de uma medida quantitativa de resiliência (talvez um índice multicritério para representar os aspectos principais de resiliência), para que seu bom funcionamento no longo prazo seja estabelecido. Para funcionar em uma perspectiva de longo prazo é de suma importância assegurar a resiliência do sistema, já que visar apenas a redução do risco pode não ser suficiente com o passar do tempo que torna o sistema suscetível ao acúmulo cada vez maior dos efeitos estressores. A partir de sistemas de drenagem resiliente é possível aumentar capacidade adaptativa do sistema e atuar na redução das vulnerabilidades. Essa frente de simulação abre o debate sobre o desempenho de projetos de lógica tradicional e sustentável e seus níveis de resiliência, assuntos amplamente discutidos pela literatura científica.

Em termos de adequação do sistema de drenagem, é provável que se verifique a importância de combinar localmente algumas medidas tradicionais, onde claramente há falhas do projeto original, dando consistência à capacidade de descarga do sistema. Essa expectativa vem do próprio conhecimento pregresso da bacia objeto de estudo, que tem uma notória restrição de capacidade, em uma seção subterrânea do seu rio principal, e uma falha de operação da comporta que interliga o Rio dos Macacos à Lagoa Rodrigo de Freitas, fazendo com que as inundações sejam potencializadas pelo remanso hidráulico. Ignorar essas correções e tentar adequar o sistema apenas com novas intervenções demandaria um esforço de projeto muito grande, em termos de adaptação sustentável do sistema. Nesse sentido, o projeto para inundações da bacia de estudo aponta para uma abordagem híbrida, em que soluções de lógica tradicional e sustentável são conjugadas de forma a obter o maior controle possível das inundações, sendo uma estratégia de convergência tanto para a reorganização dos escoamentos agravados pela ocupação informal, como para adaptação do sistema às mudanças climáticas.

Com base nesse estudo para a região, é possível observar os padrões atuais de escoamento no sistema composto por Rio dos Macacos - Rio Rainha - Canal do Jóquei - Lagoa, de modo a poder elaborar um conjunto de intervenções propostas no âmbito da redução de inundações na bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas e, mais especificamente, no bairro do Jardim Botânico. A partir dos subsídios fornecidos no presente trabalho, sugere-se para aplicação em trabalhos futuros, um complemento na metodologia apresentada para jogar luz sobre a análise da resiliência dos projetos quando submetidos a estressores produzidos em cenários futuros. A motivação para o desenvolvimento dessa metodologia foi fornecer um método de comparação entre projetos de lógica tradicional e sustentável, para demonstrar em dados práticos, os benefícios associados a drenagem sustentável. O que se observa ainda hoje no Brasil, apesar de todo o progresso científico da drenagem urbana em direção a sustentabilidade, é a extensa execução de obras de engenharia dentro da abordagem tradicional em drenagem urbana com propostas de lógica corretiva. Muitas vezes, para que haja uma mudança de paradigma com efeitos práticos, é necessário mostrar resultados reais de suas vantagens. Um exemplo possível seria submeter o projeto apresentado pelo Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais (PDMAP) para a Bacia do Rio dos Macacos – que configuraria um projeto de lógica tradicional – em confronto com um projeto de lógica sustentável a ser desenvolvido. Nesse sentido, segue abaixo a metodologia complementar proposta.

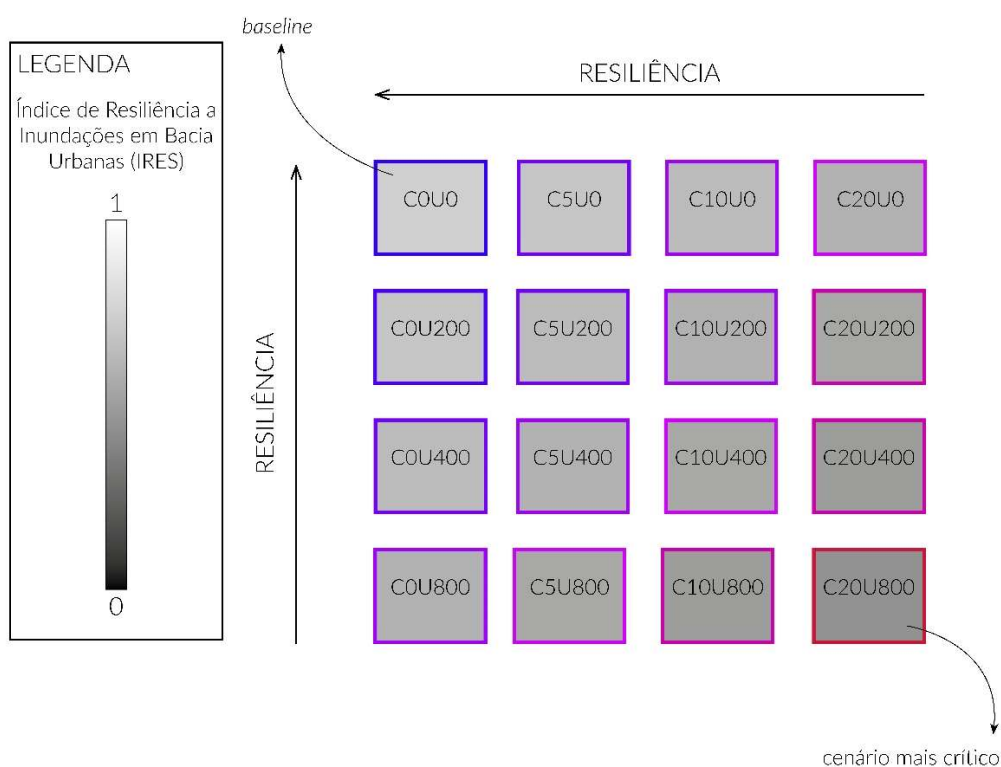
As etapas apresentadas abaixo compõem um conjunto de etapas complementares às desenvolvidas neste trabalho para nortear as simulações de um projeto de adequação da

drenagem da área a ser estudada, de forma a garantir sua sustentabilidade e resiliência. Para resgatar as etapas anteriores da metodologia, ver subcapítulo 4.3 para retomar o Quadro Metodológico desta dissertação. A sequência de procedimentos metodológicos propostos para trabalhos futuros está descrita a seguir:

4. Calcular o Índice de Resiliência a Inundações em Bacias Urbanas (IRES) proposto por Rezende (2018) para cada cenário simulado;

A Figura 44 representa a etapa 4 da proposta metodológica complementar a ser aplicada em trabalhos futuros, representando o método de aplicação do IRES aos cenários de simulação.

Figura 44 – Aplicação do IRES para cada cenário simulado.

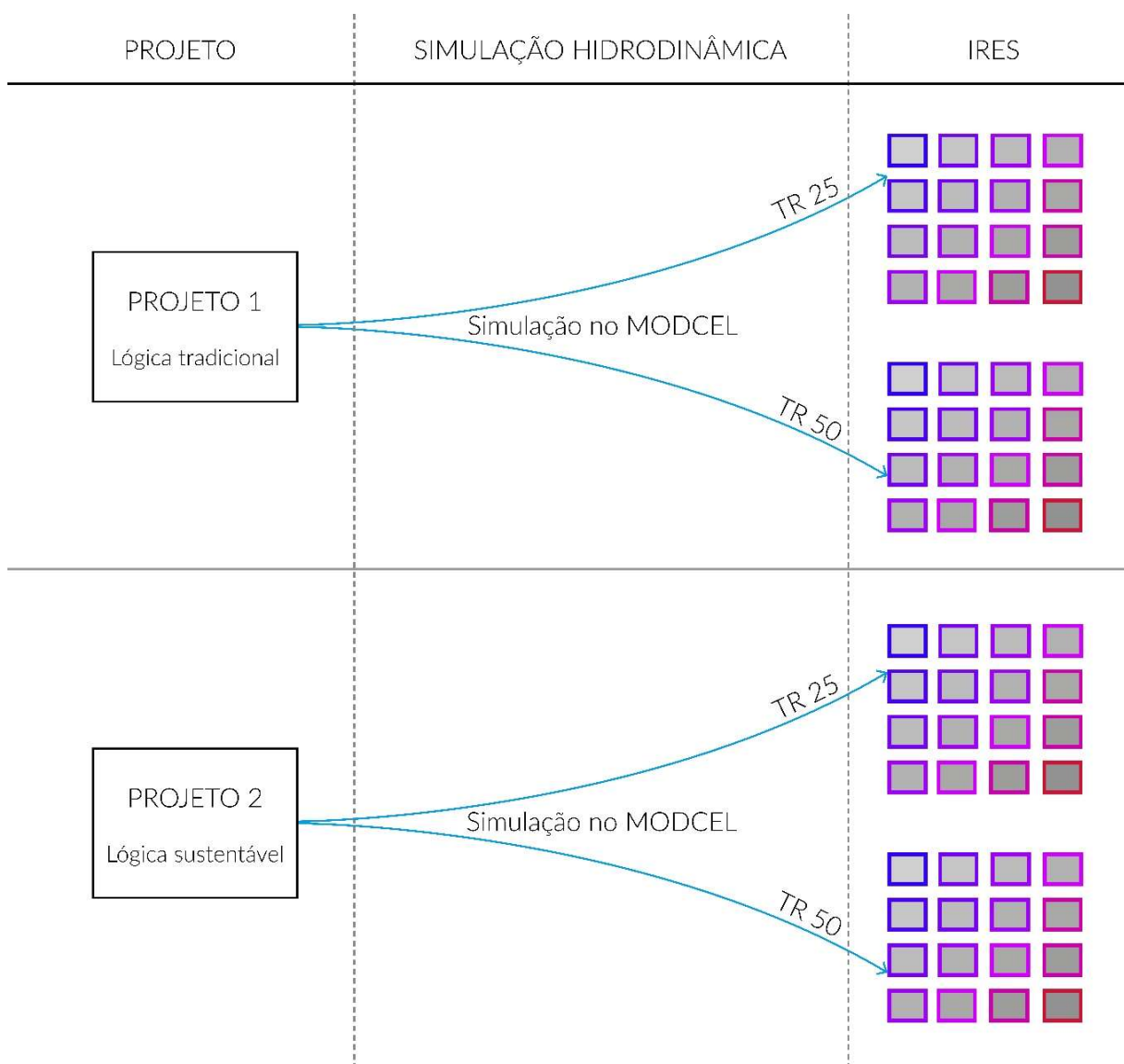


Fonte: Autora.

5. Simular o modelo hidrodinâmico nos TR de 25 e 50 anos de diferentes cenários de intervenção considerando projetos que utilizem soluções baseadas em práticas tradicionais e projetos dentro da concepção da lógica sustentável em drenagem urbana;
6. Calcular o Índice de Resiliência a Inundações em Bacias Urbanas (IRES) resultante de cada projeto para cada um dos cenários simulados para identificar qual projeto apresenta a melhor resposta;

A Figura 45 faz a representação do fluxograma das etapas 5 e 6 para aplicação da metodologia proposta para identificação do melhor projeto.

Figura 45 – Metodologia para identificar o melhor projeto.



Fonte: Autora.

7. Definir o melhor projeto para o cenário *baseline* (medido através do IRES para a bacia).

Nas discussões atuais, é importante levar em consideração as possibilidades de falha de um projeto quando deparado com uma situação futura adversa incomum e imprevisível, onde a resiliência irá desempenhar um papel importante. A escala de resiliência não se destina a quantificar valores absolutos, ou seja, o foco dos resultados encontra-se em termos relativos, e é construído para avaliar comparativamente respostas futuras de resiliência. Neste contexto, diferentes alternativas de projeto para controle de inundações urbanas no presente, introduzindo

resultados análogos de resistência do sistema, podem ser comparados em termos de resiliência futura com comportamentos diferentes. A proposta metodológica complementar exposta anteriormente, visa contribuir para projetos de drenagem mais resilientes.

Em paralelo, outra frente de pesquisa é passível de ser desenvolvida a partir da base do presente trabalho, relacionada às questões patrimoniais de proteção de bens urbanos. A partir do levantamento dos decretos de tombamento estabelecidos, seria possível questionar a sua pertinência quanto ao grau de proteção e sua influência na conservação do patrimônio para o caso específico de inundações urbanas. Os tombamentos mais rígidos tornam os imóveis intocáveis a qualquer tipo de modificação, impedindo a realização de intervenções no espaço que podem resultar em sua própria degradação, invalidando assim, o seu propósito. Essa pesquisa teria o objetivo de promover um debate necessário sobre as possíveis repercussões das medidas de proteção patrimonial em áreas vulneráveis a inundações, e investigar a hipótese de que a flexibilização dos decretos de tombamento pode atuar não só na conservação do próprio bem, mas também na contribuição do bom funcionamento e preservação de seu entorno e na redução do risco, na medida que contribuem para a diminuição das inundações urbanas. Tomando a área de estudo desta dissertação como exemplo, é possível afirmar que alguns bens tombados se situam em áreas estratégicas para a complementação do sistema de drenagem, como o Jockey Club Brasileiro, o Parque Jardim Botânico e até mesmo a comporta da Rua General Garzón que foi utilizada nas simulações do presente trabalho. A partir disso, seria possível incitar esse debate acerca de algumas cidades, como por exemplo Petrópolis, que possui uma grande quantidade bens tombados e sofre com inundações recorrentes, ou Paraty, cidade que possui certificado de Patrimônio Mundial pela UNESCO e tem sua preservação ameaçada pelo aumento do nível do mar e tempestades que influenciam na maré e na ocorrência de inundações. Essa pesquisa será desenvolvida futuramente pela autora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Maurício de Almeida. A evolução urbana do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: IPP, 2008.

ADNAN, M. S. G.; ABDULLAH, A. Y. M.; DEWAN, A.; HALL, J. W. The effects of changing land use and flood hazard on poverty in coastal Bangladesh. *Land Use Policy*, v. 99, p. 104868, 2020.

ARMAS, I.; AVRAM, E. Perception of flood risk in Danube Delta, Romania. *Natural Hazards*, v. 48, p. 275-288, 2009.

ARNONE, Elisa; PUMO, Dario; FRANCIANE, Antonio; LA LOGGIA, Goffredo; NOTO, Leonardo V. The role of urban growth, climate change, and their interplay in altering runoff extremes. *Hydrological Processes*, v. 32, n. 13, p. 2048-2063, 2018.

AHERN, J. From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, v. 100, n. 4, p. 341-343, 2011. ISSN 0169-2046.

AVAND, M.; MORADI, H. R.; RAMAZANZADEH LASBOYEE, M. Spatial prediction of future flood risk: An approach to the effects of climate change. *Geosciences*, v. 11, n. 1, artigo 25, 2021.

BANCO MUNDIAL. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. Nova Iorque: Nações Unidas, 2018.

BARATA, MARTHA MACEDO DE LIMA; CONFALONIERI, ULISSES E. CAVALCANTI; MARINHO, DIANA PINHEIRO; NETO, CRISTINA COSTA; LUIGI, GIOVANNINI; SILVIA, HELIANA VILELA DE OLIVEIRA; TOSTA, FREDERICO DE OLIVEIRA; PEREIRA, CARLOS ALEXANDRE RODRIGUES; MARINCOLA, Felipe Carvalho Vommaro. Mapa de Vulnerabilidade da População dos Municípios do Estado do Rio de Janeiro frente às Mudanças Climáticas. Rio de Janeiro. 2013.

BARCELLOS, Christovam; MONTEIRO, Antonio Miguel Vieira; CORVALÁN, Carlos; GURGEL, Helen C.; CARVALHO, Marília Sá; ARTAXO, Paulo; HACON, Sandra; RAGONI, Virginia. Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, [S. l.], v. 18, n. 3, 2009. DOI: 10.5123/s1679-49742009000300011.

BENEVOLO, L. A cidade e o arquiteto. São Paulo: Perspectiva, 2001.

BENEVOLO, Leonardo. A História da Cidade. São Paulo: Perspectiva, 1991.

BICALHO, Monira; MYNSSEN, Claudine. Trilha Interpretativa de Samambaias e Licófitas no Parque Nacional da Tijuca, Rio de Janeiro. *Biodiversidade Brasileira - BioBrasil*, v. 10, p. 177-186, 2020.

BOTZEN, W. J. W.; AERTS, J. C. H. J.; VAN DEN BERGH, J. C. J. M. Dependence of flood risk perceptions on socioeconomic and objective risk factors. *Water Resources Research*, v. 45, p. 1-15, 2009.

BRANDT, S. A.; LIM, N. J.; COLDING, J.; BARTHEL, S. Mapping flood risk uncertainty zones in support of urban resilience planning. *Urban Planning*, v. 6, n. 3, p. 258-271, 2021.

BRÊDA, J. P. L. F. et al. Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *Climatic Change*, v. 159, n. 4, p. 503-522, 2020.

BRILLY, M.; POLIC, M. Public perception of flood risks, flood forecasting and mitigation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 5, n. 3, p. 345-355, 2005.

BROWN R., KEATH N., e WONG T. Transitioning to Water Sensitive Cities: Historical, Current and Future Transition States. Proc 11ICUD, EICC, Edinburgo, Escócia. Setembro, 2007.

CHOU, C.; NEELIN, J. D. Mechanisms of Global Warming Impacts on Regional Tropical Precipitation. *Journal of Climate*, v. 17, n. 13, p. 2688-2701, 2004.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Applied hydrology. McGraw-Hill Book Company, 1998.

CHRISTOFIDIS, Demetrios; ASSUMPÇÃO, Rafaela dos Santos Facchetti Vinhaes; KLIGERMAN, Débora Cynamon. A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza. 2019.

CHRISTOFIDIS, D. Hidroética: água, ética e meio ambiente. In: SGANZERLA, A.; RAULI, P. M. F.; RENK, V. E. (Org.). Bioética Ambiental. Curitiba: PUCPRESS, 2018. p. 209-234.

CONSÓRCIO QUANTA CONSULTORIA – LERNER ARQUITETOS ASSOCIADOS. Modelar a Metrópole. Rio de Janeiro. 2016.

COPPE/UFRJ. Estratégia de Adaptação às Mudanças Climáticas da Cidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2016.

CRED & UNDRR. (2020). The human cost of disasters: An overview of the last 20 years (2000-2019). Centre for Research on the Epidemiology of Disasters and UN Office for Disaster Risk Reduction.

DERECZYNSKI, Claudine; SILVA, Wanderson Luiz; MARENGO, Jose. Detection and Projections of Climate Change in Rio de Janeiro, Brazil. American Journal of Climate Change, [S. l.], v. 02, n. 01, p. 25–33, 2013. DOI: 10.4236/ajcc.2013.21003.

DONG, Xin; GUO, Hao; ZENG, Siyu. Enhancing future resilience in urban drainage system: Green versus grey infrastructure. Water Research, [S. l.], v. 124, p. 280–289, 2017. DOI: 10.1016/j.watres.2017.07.038. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.038>.

DU, S.; ROMPAEY, A. V.; SHI, P.; WANG, J. A dual effect of urban expansion on flood risk in the Pearl River Delta (China) revealed by land-use scenarios and direct runoff simulation. Natural Hazards, v. 77, n. 1, p. 111-128, 2015.

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.], 2015. DOI: 10.1080/1573062X.2014.916314.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. Déficit habitacional no Brasil – 2016-2019. Belo Horizonte: FJP, 2021. 169 p.: il.

FUNDAÇÃO RIO-ÁGUAS. Instrução Técnica para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamento Hidráulico de Sistemas de Drenagem Urbana. Subsecretaria de Gestão de Bacias Hidrográficas - Rio-Águas, 1ª versão, 2010.

FUNDAÇÃO RIO-ÁGUAS. Rios de Janeiro: Um manual dos rios, canais e corpos hídricos da cidade do Rio de Janeiro. 1. ed. Rio de Janeiro, 2020.

GASSER, P.; LUSTENBERGER, P.; CINELLI, M.; KIM, W.; SPADA, M.; BURGHER, P.; HIRSCHBERG, S.; STOJADINOVIC, B.; SUN, T. Y. A review on resilience assessment of energy systems. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, p. 1-27, 2019.

HAMMOND, M. J.; CHEN, A. S.; DJORDJEVIĆ, S.; BUTLER, D.; MARK, O. Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review. *Urban Water Journal*, v. 12, n. 1, p. 14-29, 2013.

HERZOG, Cecilia Polacow. Cidades para todos - (re)aprendendo a conviver com a Natureza. 1. ed. Rio de Janeiro: Mauad, 2013.

HLODVERSDOTTIR, Asta Osk; BJORNSSON, Brynjolfur; ANDRADOTTIR, Hrunn Olof; ELIASSON, Jonas; CROCHET, Philippe. Assessment of flood hazard in a combined sewer system in Reykjavik city centre. *Water Science and Technology*, v. 71, n. 10, p. 1471-1477, 2015.

HOLLING, C. S. Engineering resilience versus ecological resilience. In: HOLLING, C. S. *Engineering within ecological constraints*. 1996.

HUONG, H. T. L.; PATHIRANA, A. Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 17, p. 379-394, 2013.

IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team: R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.

IPCC. *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 27 jul. 2024.

IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team: H. Lee and J. Romero (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 2023. 184 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

IRPH – Instituto Rio Patrimônio da Humanidade. *Guia das APAC nº14*. Hipódromo da Gávea, Jardim Botânico e Chácara do Algodão, 2012.

JACKSON, S. Overview of resilience and theme issue on the resilience of systems. *Insight*, v. 18, n. 1, p. 7-9, 2015.

JOHNSON, A. *Green infrastructure: A new strategy for stormwater management in downtown Wichita*. 2013.

JONES, D. D.; HOLLING, C. S.; PETERMAN, R. M. Fail-safe vs. safe-fail catastrophes. August 1975. WP-75-93.

KARAMOUZ, Mohammad; HOSSEINPOUR, Ana; NAZIF, Sara. Improvement of Urban Drainage System Performance under Climate Change Impact: Case Study. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 16, n. 5, 2011.

KARKI, R.; HASSON, S.; SCHICKHOFF, U.; SCHOLTEN, T.; BOHNER, J. Rising precipitation extremes across Nepal. *Climate*, v. 5, n. 1, p. 1-25, 2017.

KASPERSEN, Per Skougaard; RAVN, Nanna Høegh; ARNBJERG-NIELSEN, Karsten; MADSEN, Henrik; DREWS, Martin. Comparison of the impacts of urban development and climate change on exposing European cities to pluvial flooding. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017.

KHARIN, V. V.; ZWIERS, F. W.; ZHANG, X.; WEHNER, M. Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Climatic Change*, v. 119, n. 2, p. 345-357, 2013.

KIM, Y.; EISENBERG, D. A.; BONDANK, E. N.; et al. Fail-safe and safe-to-fail adaptation: decision-making for urban flooding under climate change. *Climatic Change*, v. 145, p. 397–412, 2017.

KOÇANGUL, E.; TRAN, M.; CONNOR, R. et al. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2018: Soluções baseadas na natureza para gestão das águas. Itália: Unesco, 2018.

LEE, J.; BEDNARZ, R. Effect of GIS learning on spatial thinking. *Journal of Geography in Higher Education*, v. 33, n. 2, p. 183-198, 2009.

LEMOS, Maria Fernanda Rodrigues Campos. Adaptação de cidades para mudança climática: uma metodologia de análise para os planos diretores municipais. 2010. UFRJ, [S. l.], 2010a.

LEMOS, Maria Fernanda Rodrigues Campos. Planejamento urbano para enfrentamento de riscos ambientais, redução de vulnerabilidade sócio-climática e adaptação de cidades. Simpósio Temático Urbanismo na Sociedade de Risco: Violência Urbana e Vulnerabilidade Ambiental, 2010b.

LI, Guo-Fang; XIANG, Xin-Yi; TONG, Yi-Yi; et al. Impact assessment of urbanization on flood risk in the Yangtze River Delta. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 27, p. 1683-1693, 2013.

MAHMOOD, Mohamad Ibrahim; ELAGIB, Nadir Ahmed; HORN, Finlay; SAAD, Suhair A.G. Lessons learned from Khartoum flash flood impacts: An integrated assessment. *Science of The Total Environment*, v. 601-602, p. 1031-1045, 2017.

MAHMOUD, Shereif H.; GAN, Thian Yew. Multi-criteria approach to develop flood susceptibility maps in arid regions of Middle East. *Journal of Cleaner Production*, v. 196, p. 216-229, 2018.

MIGUEZ, M. G.; BATTEMARCO, B. P.; DE SOUSA, M. M.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P.; GUSMAROLI, G. Urban Flood Simulation Using MODCEL – An Alternative Quasi-2D Conceptual Model. *Water*, v. 9, p. 445, 2017.

MIGUEZ, MARCELO; DI GREGÓRIO, LEANDRO; VERÓL, Aline. *Gestão de Riscos e Desastres Hidrológicos*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

MIGUEZ, MARCELO; VERÓL, ALINE; REZENDE, Osvaldo. *Drenagem Urbana - Do projeto tradicional à sustentabilidade*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

MUKHERJEE, S.; AADHAR, S.; STONE, D.; MISHRA, V. Increase in extreme precipitation events under anthropogenic warming in India. *Weather and Climate Extremes*, v. 20, p. 45-53, 2018.

MUSTAFA, A. et al. Effects of spatial planning on future flood risks in urban environments. *Journal of Environmental Management*, v. 225, p. 193-204, 2018.

NEELIN, J. D. et al. Long tails in deep columns of natural and anthropogenic tropospheric tracers. *Geophysical Research Letters*, v. 37, n. 5, 2010.

NIGUSSIE, T. A.; ALTUNKAYNAK, A. Modeling the effect of urbanization on flood risk in Ayamama Watershed, Istanbul, Turkey, using the MIKE 21 FM model. *Natural Hazards*, v. 99, n. 2, p. 1031-1047, 2019.

NOFAL, O. M., & VAN DE LINDT, J. W. (2022). Understanding flood risk in the context of community resilience modeling for the built environment: Research needs and trends. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 7(3), 171–187.

O'DONNELL, Emily; THORNE, Colin; AHILAN, Sangaralingam; ARTHUR, Scott; BIRKINSHAW, Stephen; BUTLER, David; DAWSON, David; EVERETT, Glyn; FENNER, Richard; GLENIS, Vassilis. The blue-green path to urban flood resilience. *Blue-Green Systems*, v. 2, n. 1, p. 28-45, 2020.

OGDEN, Fred L.; PRADHAN, Nawa Raj; DOWNER, Charles W.; ZAHNER, Jon A. Relative importance of impervious area, drainage density, width function, and subsurface storm drainage on flood runoff from an urbanized catchment. *Water Resources Research*, 2011.

OLIVEIRA, Antonio Krishnamurti Beleño De. O Sistema de Drenagem como Eixo Estruturante do Planejamento Urbano: Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Acari. 2018. Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2018.

OLIVEIRA, A. K. B.; SOUSA, M. M.; REZENDE, O. M.; MAGALHÃES, P. M. C.; JACOB, A. C. P.; MAGALHÃES, P. C.; MIGUEZ, M. G. Evaluating the role of urban drainage flaws in triggering cascading effects on critical infrastructure, affecting urban resilience. *Infrastructures*, v. 7, n. 11, artigo 153, 2022.

OLIVEIRA, Antonio Krishnamurti Beleño de; ALVES, Lucas Magalhães Carneiro; CARVALHO, Carolina Lopes; HADDAD, Assed Naked; MAGALHÃES, Paulo Canedo de; MIGUEZ, Marcelo Gomes. A framework for assessing flood risk responses of a densely urbanized watershed, to support urban planning decisions. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, v. 8, n. 4, 2023.

PANTELI, M.; MANCARELLA, P. Modeling and evaluating the resilience of critical electrical power infrastructure to extreme weather events. *IEEE Systems Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 1733-1742, sept. 2017. DOI: 10.1109/JSYST.2015.2389272.

PIRES, Lucas Andrade e DE OLIVA, Igor Salles. Projeto conceitual para mitigação de inundações na bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigues de Freitas, com foco no bairro do Jardim Botânico. Rio de Janeiro, 2023. 180 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

REZENDE, Osvaldo Moura. Análise Quantitativa da Resiliência a Inundações para o Planejamento Urbano: Caso da Bacia do Canal do Mangue no Rio de Janeiro. 2018. Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2018.

RIGUETTO, A. M.; MOREIRA, L. F. F.; SALES, T. E. A. Manejo de águas pluviais urbanas. In: RIGUETTO, A. M. (Org.). Manejo de águas pluviais urbanas. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p. 19-73.

SANTOS, Milton. Por uma outra globalização: do pensamento único à consciência universal. 20. ed. Rio de Janeiro: Record, 2000.

SAYERS, P.; LI, Y.; GALLOWAT, G.; PENNING-ROUSELL, E; SHEN, F.; WEN, K.; CHEN, Y.; LE QUESNE, T. Flood Risk Management: A Strategic Approach. Paris.

TUCCI, Carlos E. M. Drenagem Urbana. *Ciência e Cultura*, [S. l.], v. 55, 2003.

UNDRR. The human cost of weather related disasters 1995-2015. [s.l: s.n.].

SHENG, J.; WILSON, J.P. Watershed urbanization and changing flood behavior across the Los Angeles metropolitan region. *Natural Hazards*, v. 48, p. 41-57, 2009.

SINGH, P.; AMEKUDZI-KENNEDY, A.; ASHURI, B.; CHESTER, M.; LABI, S.; WALL, T. A. Developing adaptive resilience in infrastructure systems: An approach to quantify long-term benefits. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, v. 8, supl. 1, p. 1-22, 2022.

SODEN, B. J.; HELD, I. M. An Assessment of Climate Feedbacks in Coupled Ocean-Atmosphere Models. *Journal of Climate*, v. 19, n. 14, p. 3354-3360, 2006.

SOUSA, M. M.; OLIVEIRA, A. K. B.; REZENDE, O. M.; MAGALHÃES, P. M. C.; PITZER JACOB, A. C.; DE MAGALHÃES, P. C.; MIGUEZ, M. G. Highlighting the role of the model user and physical interpretation in urban flooding simulation. *Journal of Hydroinformatics*, v. 24, n. 5, p. 976-991, 2022.

TABARI, H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 1-10, 2020.

THORNE, C.; LAWSON, E. C.; OZAWA, C.; HAMLIN, S. L.; SMITH, L. A. Uncertainties and barriers to adoption of BGI. *Journal of Flood Risk Management*, v. 11, p. S960-S972, 2018.

TORRES ABELLO, A. E. Apuntes de clase sobre Hidrología urbana. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2004. 252 p.

TSAKIRIS, G. Flood risk assessment: concepts, modelling, applications. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 14, p. 1361-1369, 2014.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. Inundações Urbanas na América do Sul. 1. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003. ISBN 85-88686-07-4.

TUCCI, C. E. M. Gestão de águas pluviais urbanas. 2005.

VASCONCELLOS, Andréa Araujo. Infraestrutura Verde Aplicada ao Planejamento da Ocupação Urbana na Bacia Ambiental do Córrego D'Antas, Nova Friburgo – RJ. Rio de Janeiro, 2011. 187 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

WING, M. G.; BETTINGER, P. GIS: An updated primer on a powerful management tool. *Journal of Forestry*, v. 101, n. 3, p. 4-10, 2003.

WU, Meimei; WU, Zening; GE, Wei; WANG, Huiliang; SHEN, Yanxia; JIANG, Mengmeng. Identification of sensitivity indicators of urban rainstorm flood disasters: A case study in China. *Journal of Hydrology*, v. 599, 2021.

YANG, G.; BOWLING, L. C.; CHERKAUER, K. A.; PIJANOWSKI, B. C. The impact of urban development on hydrologic regime from catchment to basin scales. *Landscape and Urban Planning*, v. 103, n. 2, p. 237-247, 2011.

YAZDANFAR, Zeinab; SHARMA, Ashok. Urban drainage system planning and design – challenges with climate change and urbanization: a review. *Water Science and Technology*, v. 72, n. 2, p. 165-179, 1 jul. 2015.

YIN, Jie; YU, Dapeng; YIN, Zhane; LIU, Min; HE, Qing. Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road network: A case study in the city center of Shanghai, China. *Journal of Hydrology*, v. 537, p. 138-145, 2016.

YIRSAW, E.; WU, W.; SHI, X.; TEMESGEN, H.; BEKELE, B. Land Use/Land Cover Change Modeling and the Prediction of Subsequent Changes in Ecosystem Service Values in a Coastal Area of China, the Su-Xi-Chang Region. *Sustainability*, v. 9, p. 1204, 2017.

YUAN, Y.; ZHENG, Y.; HUANG, X.; ZHAI, J. Climate resilience of urban water systems: A case study of sponge cities in China. *Journal of Cleaner Production*, v. 451, p. 141781, 2024. ISSN 0959-6526.

ZEVENBERGEN, C.; GERSONIUS, B.; RADHAKRISHAN, M. Flood resilience. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, v. 378, n. 2168, 20190212, 2020.

ZHANG, X. Q. The trends, promises and challenges of urbanization in the world. *Habitat International*, v. 54, p. 241-252, 2016.

ZHANG, Y. et al. Assessment of future flash flood inundations in coastal regions under climate change scenarios – a case study of Hadahe River basin in northeastern China. *The Science of the Total Environment*, v. 693, 2019.

ZHOU, Qianqian; LENG, Guoyong; HUANG, Maoyi. Impacts of future climate change on urban flood volumes in Hohhot in northern China: benefits of climate change mitigation and adaptations. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 22, n. 1, p. 305-316, 2018.

ZILLI, Marcia T.; CARVALHO, Leila M. V; SILVA, Maria A. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. [S. l.], 2016. DOI: 10.1002/joc.4840.