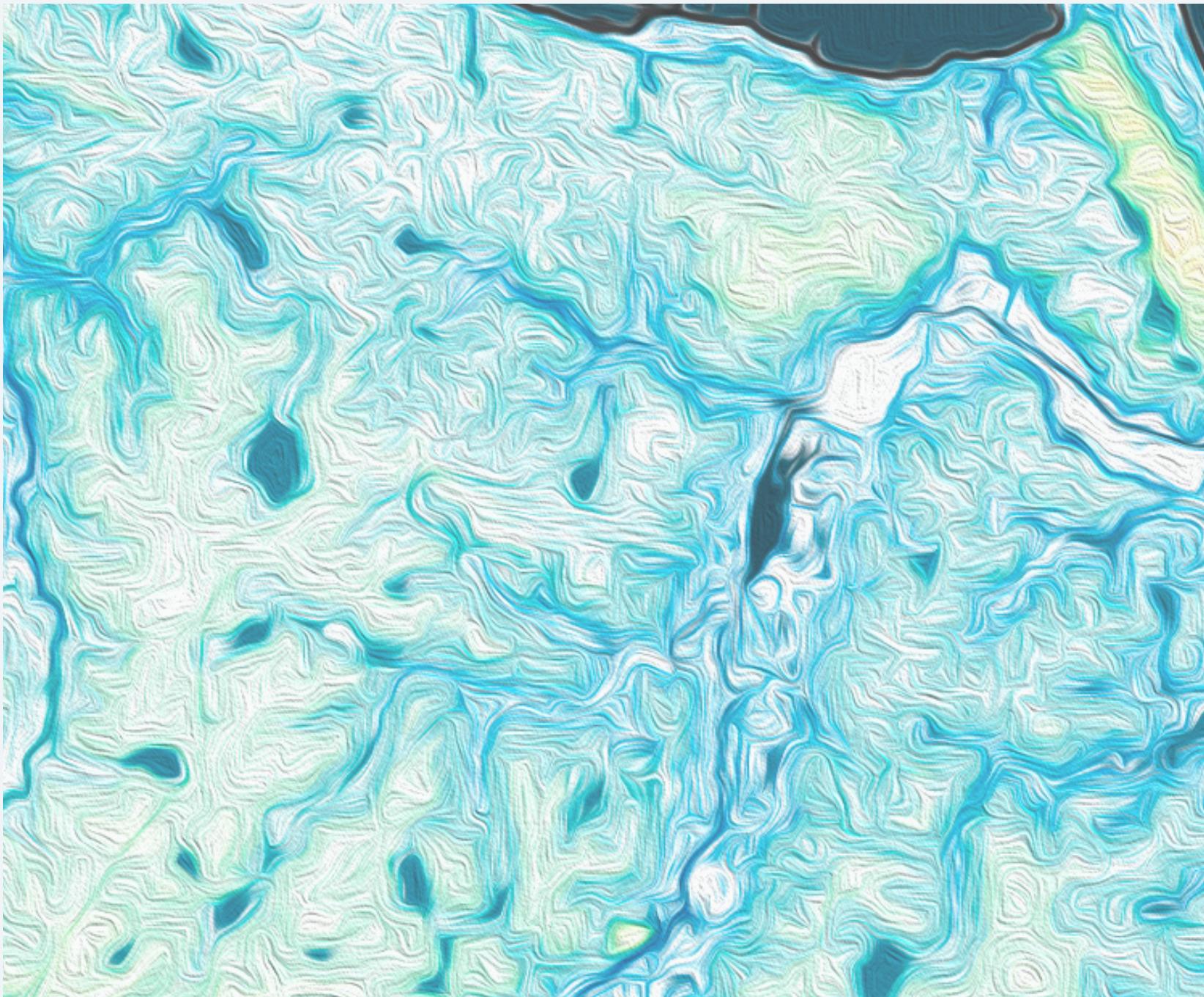


# MODELAGEM DA INFORMAÇÃO E A NATUREZA COMO INFRAESTRUTURA: Ferramentas para a Resiliência da Paisagem Urbana a Inundações no Contexto Brasileiro



**Autora:** Tainah Frota Carvalho  
**Orientador:** Newton Célio Becker de Moura  
**Co-orientador:** Paulo Jorge Alcobia Simões



UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO CEARÁ

PPG  
**au+d**  
UFC

Fortaleza  
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

C329m Carvalho, Tainah.  
Modelagen da Informação e a Natureza como Infraestrutura : Ferramentas para a Resiliência da  
Paisagem Urbana a Inundações no Contexto Brasileiro / Tainah Carvalho. – 2025.  
93 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Arquitetura e Urbanismo e Design,  
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo e Design, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Newton Célio Becker de Moura.  
Coorientação: Prof. Dr. Paulo Jorge Alcobia Simões .

1. Resiliência Urbana. 2. Mitigação de Inundações. 3. Soluções Baseadas na Natureza. 4. Infraestruturas  
Azuis. 5. Modelagem da Informação. I. Título.

CDD 720

---

TAINAH FROTA CARVALHO

MODELAGEM DA INFORMAÇÃO E A NATUREZA COMO INFRAESTRUTURA:  
FERRAMENTAS PARA A RESILIÊNCIA DA PAISAGEM URBANA A INUNDAÇÕES  
NO CONTEXTO BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Urbanismo e Design da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo e Design. Área de concentração: Modelagem da Informação.

Orientador: Prof. Dr. Newton Célio Becker de Moura.

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Jorge Alcobia Simões.

FORTALEZA

2025

TAINAH FROTA CARVALHO

MODELAGEM DA INFORMAÇÃO E A NATUREZA COMO INFRAESTRUTURA:  
FERRAMENTAS PARA A RESILIÊNCIA DA PAISAGEM URBANA A INUNDAÇÕES  
NO CONTEXTO BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Urbanismo e Design da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de para a obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo e Design. Área de concentração: Modelagem da Informação.

Aprovada em: 31/01/2025.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Newton Célio Becker de Moura (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Paulo Jorge Alcobia Simões  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Mariana Monteiro Xavier de Lima  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. José Rodolfo Scarati Martins  
Universidade de São Paulo (USP)

## AGRADECIMENTOS

**Tenho o privilégio de saber que, se fosse ser específica ao escrever os agradecimentos deste trabalho, eles facilmente ocupariam um capítulo à parte. Acredito que a academia deve ser construída de forma coletiva, e é assim que enxergo meu trabalho: uma construção coletiva. Tive a sorte de estar rodeada de pessoas com inteligência e vontade de fazer o melhor, por todos nós.**

Agradeço aos membros da banca avaliadora deste trabalho por aceitarem meu convite. Me sinto honrada. Ao meu sempre orientador e companheiro de pesquisas, Newton Becker, por todas as inúmeras oportunidades que me ofereceu para crescer tanto como pesquisadora. Sei que os frutos desse aprendizado continuarão a se manifestar por muitos anos, e sou imensamente grata por sua orientação e confiança ao longo do caminho. Ao professor Paulo Simões, pelas longas conversas carregadas de bons conselhos. À professora Mariana Ximenes, que embora não fosse minha orientadora, sempre se mostrou solícita em auxiliar em qualquer questão e esteve sempre presente, oferecendo seu apoio e direção. Por fim, ao professor Rodolfo Scarati, por quem eu tenho grande admiração e por ter aceito o convite de fazer parte da banca.

Agradeço à Universidade Federal do Ceará, especificamente ao Instituto de Arquitetura, Urbanismo e Design, pelo suporte financeiro que me permitiu a dedicação de forma quase exclusiva ao tema da minha pesquisa ao longo desses dois anos. Destaco ainda o Laboratório de Experiência Digital (LED), que, desde a graduação, tem sido a incubadora dos meus planos de pesquisa, não apenas por meio de todo o aparato físico, mas, principalmente, pelo seu aparato humano.

Gostaria de agradecer aos coordenadores, professores e colegas de academia, os quais estão sempre disponíveis para tirar uma dúvida ou discutir uma questão. Entre eles, gostaria de agradecer e reconhecer em especial o João Pedro Deodato Barreto: tem partes do seu trabalho espalhados por essa dissertação. Queria agradecer também aos grupos de trabalho e pesquisa do Corredor Cultural, do Congresso Geodesign *South America 2023* e do LEDRx. Entre seus membros, destaco os professores Diego Ricca, Daniel Cardoso e Eugênio Moreira.

Cada estudo de caso abordado nesta dissertação só foi possível graças ao envolvimento e a boa vontade de diversas pessoas e instituições.

**Estudo de caso da Bacia do Mata-Fome:** Agradeço à Universidade Federal do Pará (UFPA), em nome da professora Ana Cláudia Cardoso, pela disponibilidade e pela parceria de sua equipe ao trabalharmos em conjunto. Agradeço também à Prefeitura de Belém do Pará.

**Estudo de caso do Grande Bom Jardim:** Agradeço à equipe de trabalho do Projeto Caminhos Verdes e Azuis pela colaboração contínua. Minha gratidão também ao Instituto de Pesquisa e Planejamento de Fortaleza (IPPLAN), especialmente à equipe da Diretoria de Planejamento (DIPLA), pela parceria. Além disso, sou grata à disponibilidade da equipe do Centro Cultural Bom Jardim e aos moradores da Comunidade São Francisco, cujo envolvimento foi imperativo para o sucesso deste estudo.

**Estudo de caso dos jardins filtrantes de Sobral:** Agradeço à

equipe responsável pela avaliação dos jardins filtrantes implantados em Sobral, especialmente à bióloga Maitê Pinheiro, por todo o aprendizado coletivo gerado durante o processo. Também sou grata à Prefeitura de Sobral pela oportunidade de realizar este estudo e pela confiança depositada.

**Sem as pessoas do local não há compreensão real da paisagem.**

Por fim, o mais importante: gostaria de agradecer aos meus pais, que foram os pilares fundamentais que me sustentaram e me permitiram chegar até aqui. Agradeço ao meu companheiro, sempre o primeiro revisor de todos os textos presentes nessa dissertação, pelo suporte emocional inabalável e pelo constante incentivo. Sou grata à minha psicóloga, cujo apoio foi essencial para que eu chegassem até aqui de forma sã. Agradeço também ao meu revisor, que, com seu olhar atento, contribuiu para tornar minhas palavras melhores. Por fim, sou grata aos meus familiares e amigos, que sempre me lembram do que realmente importa.

## RESUMO

As cidades brasileiras enfrentam desafios significativos relacionados à resiliência urbana diante de inundações, especialmente em contextos de crescimento desordenado e infraestrutura insuficiente. Esta dissertação investiga como a natureza, enquanto infraestrutura, pode ser aplicada para promover resiliência urbana, explorando o papel das Soluções Baseadas na Natureza (SBN) e das Infraestruturas Azuis (IeA). O objetivo principal é analisar como as SBN podem atuar como agentes de resiliência urbana frente às inundações, considerando as características geográficas, sociais e culturais de cada território. Além disso, busca-se explorar a Modelagem da Informação Aplicada à Paisagem (LIM) como uma ferramenta capaz de responder às demandas globais sem desconsiderar as particularidades locais. A principal contribuição do trabalho está na criação de um modelo paramétrico, denominado Tucunaré, que diagnostica microbacias urbanas e propõe intervenções específicas baseadas em IeA, além de avaliar a aplicabilidade do LIM em diferentes contextos urbanos brasileiros. A pesquisa adotou revisões bibliográficas, análise de metodologias de *design* da paisagem, e desenvolvimento de estudos de caso em Belém, Fortaleza e Sobral. Os estudos incluíram *workshops* e aplicações práticas do modelo, integrando ferramentas paramétricas ao planejamento urbano e paisagístico. Os resultados mostram que o modelo Tucunaré é eficaz para diagnósticos e intervenções baseadas em IeA, contribuindo para a mitigação de inundações urbanas. Além disso, o LIM revelou-se uma abordagem viável para incorporar sustentabilidade e resiliência em projetos urbanos, inclusive em áreas vulneráveis. Por fim, a pesquisa reforça o papel das SBN e IeA como estratégias promissoras para promover resiliência urbana e destaca a importância de metodologias integradas para o planejamento resiliente.

**Palavras-chave:** Resiliência Urbana; Mitigação de Inundações; Soluções Baseadas na Natureza; Infraestruturas Azuis; Modelagem da Informação.

## ABSTRACT

Brazilian cities face significant challenges related to urban resilience to flooding, especially in contexts of unplanned growth and insufficient infrastructure. This dissertation investigates how nature, as infrastructure, can be applied to promote urban resilience, exploring the role of Nature-Based Solutions (NBS) and Blue Infrastructure (BI). The primary objective is to analyze how NBS can act as agents of urban resilience against flooding, considering the geographical, social, and cultural characteristics of each territory. Furthermore, the research aims to explore Landscape Information Modeling (LIM) as a tool capable of addressing global demands without overlooking local particularities. The main contribution of this work lies in the creation of a parametric model, named Tucunaré, which diagnoses urban micro-watersheds and proposes specific interventions based on BI, while also evaluates the applicability of LIM in different Brazilian urban contexts. The research employed literature reviews, analysis of landscape design methodologies, and case studies in Belém, Fortaleza, and Sobral. These studies included workshops and practical applications of the model, integrating parametric tools into urban and landscape planning. The results demonstrate that the Tucunaré model is effective in diagnosing and proposing interventions based on BI, contributing to the mitigation of urban flooding. Additionally, LIM proved to be a viable approach to incorporate sustainability and resilience into urban projects, including in vulnerable areas. Ultimately, the research reinforces the role of NBS and BI as promising strategies to promote urban resilience and highlights the importance of integrated methodologies for resilient planning.

**Keywords:** Urban Resilience; Flood Mitigation Nature-Based Solutions (NBS); Blue Infrastructure (BI); Information Modeling (IM)

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

**Figura 01.** Algoritmo utilizado no Projeto do córrego Jaguaré, na cidade de São Paulo. Fonte: Elaborada pela autora, 2020. . . . . 10

**Figura 02.** Projeto de renaturalização de riacho na Comunidade do Poço da Draga, em Fortaleza. Fonte: Elaborada pela autora, 2020. . 10

**Figura 03.** Imagens da simulação pluvial e das curvas de nível da microbacia do Mata-Fome, em Belém do Pará. Fonte: Elaborada pela autora. . . . . 11

**Figura 04.** Exposição Corredor Cultural Benfica, no Museu de Arte da UFC em outubro de 2023. Fonte: Acervo da autora, 2023. . . . . 12

**Figura 05.** Mancha preta em descida de tubulação de drenagem urbana para o mar da cidade de Fortaleza em 2021. Fonte: <<https://www.opovo.com.br/noticias/fortaleza/2021/02/16/chuva-carrega-lixo-do-riacho-maceio-e-deixa-mancha-escura-na-praia-do-mucuripe--veja-video.html>>. Acesso em: 6 maio. 2024. . . . . 13

**Figura 06.** Bolo de casamento dos ODS que ilustra a interdependência entre eles. Fonte: Azote, 2020. <<https://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2016-06-14-the-sdgs-wedding-cake.html>>. Acesso em: 6 maio. 2024. . . . . 13

**Figura 07.** Ilustração com os parâmetros globais para o uso de SBN. Fonte: IUCN, 2020. <[https://portals.iucn.org/library/node/49070?fbclid=IwAR2S5\\_3uZPxGZ\\_vfY9CtYUhBok4pc74quKtPk-pb4RuF6W-BAVYTkjF1SFnU](https://portals.iucn.org/library/node/49070?fbclid=IwAR2S5_3uZPxGZ_vfY9CtYUhBok4pc74quKtPk-pb4RuF6W-BAVYTkjF1SFnU)>. Acesso em: 6 maio. 2024. . . . . 14

## CAPÍTULO 2

**Figura 08.** Organograma desenvolvido no programa Miro para a RNL. Fonte: Elaborada pela autora, 2023. . . . . 17

**Figura 09.** Gráfico de quantidade de referências encontradas por ano na plataforma Science Direct para a RSL. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 18

**Figura 10.** Gráfico de quantidade de referências encontradas por ano na plataforma Capes Periódicos para a RSL. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 18

**Figura 11.** Ilustração que retrata a metodologia de pesquisa por meio da conexão entre os capítulos e seus referidos temas. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 20

**Figura 12.** Imagens da cheia do rio Guaíba em Porto Alegre, na Rua Voluntários da Pátria em 1941 e 2024. Fonte: <<https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/05/03/enchente-do-guaiba-passa-a-cheia-historica-de-1941-fotos-mostram-comparacao.ghtml>>. Acesso em: 8 maio. 2024. . . . . 22

## CAPÍTULO 3

**Figura 13.** Gráficos da analogia topográfica e as visões de espaço de estado da natureza em evolução. O sistema modifica seus próprios estados possíveis à medida que muda ao longo do tempo de 1 para 4. Neste exemplo, à medida que o tempo avança, uma perturbação progressivamente menor é necessária para alterar o estado de equilíbrio do sistema de um domínio para o outro, até que o sistema mude de estado espontaneamente. Fonte: Holling, 1996. . . . . 23

**Figura 14.** Framework da resiliência urbana. Fonte: Rockefeller Foundation, editado e traduzido pela autora, 2015. . . . . 23

**Figura 15.** Esquema conceitual do sistema urbano. Fonte: Meerow & Newell, 2016. . . . . 24

**Figura 16.** Ilustrações sequenciais das condições hídricas do território, evidenciando as fases de enchente, alagamento e inundações. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 27

**Figura 17.** Gráficos ilustrativos exemplificando a diferença entre a cidade resistente e a cidade resiliente a inundações. Fonte: Liao K., 2012. Traduzida e editada pela autora, 2020. . . . . 28

**Figura 18.** Ilustração das diferentes etapas da resiliência às inundações urbanas. Fonte: Yu et al., 2023b. . . . . 28

**Figura 19.** Imagens de cheia e seca do Yanweizhou Wetland Park, China. O parque foi planejado para funcionar durante períodos de inundações. Fonte: <<https://www.amusingplanet.com/2015/12/yanweizhou-wetland-park-china.html>>. Acesso em: 8 maio. 2024. . . . . 29

**Figura 20.** Ilustração com os diferentes serviços oferecidos pela natureza. Fonte: <<https://www.nature.scot/scotlands-biodiversity/scottish-biodiversity-strategy-and-cop15/ecosystem-approach/ecosystem-services-natures-benefits>>. Acesso em: 8 maio. 2024. . . . . 30

**Figura 21.** Ilustração dos benefícios das SBN. Fonte: <<https://www.wribrasil.org.br/noticias/solucoes-baseadas-na-natureza-para-adaptacao-em-cidades-o-que-sao-e-por-que-implementa-las>>. Acesso em: 11 novembro. 2024. . . . . 31

**Figura 22.** Infográfico das diferentes terminologias da natureza enquanto infraestrutura. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 33

**Figura 23.** Nuvem de palavras das ferramentas da natureza como infraestrutura. Foram selecionados, para cada referência estudada sobre o tema, os termos utilizados para descrever diferentes ferramentas. Em seguida, esses termos foram agrupados em uma planilha do Excel e a nuvem de palavras foi gerada no programa ‘Word Cloud’. As palavras em maior tamanho indicam que foram mencionadas com maior frequência nos textos analisados. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 34

**Figura 24.** Imagens do jardim de chuva do bairro Jabaquara na cidade de São Paulo. Fonte: <<https://editorajuma.com.br/cades-jabaquara-desenvolve-projeto-de-jardim-de-chuva-para-o-bairro/#:~:text=O%20Jardim%20de%20chuva%20foi,frequentada%20por%20usu%C3%A1rios%20de%20drogas>>. Acesso em: 11 novembro. 2024. . . . . 34

**Figura 25.** Infográfico das diferentes terminologias da natureza enquanto infraestrutura com o indicativo do escopo da pesquisa. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 35

**Figura 26.** Ilustração com exemplos de IeAs urbanas. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 37

## CAPÍTULO 4

**Figura 27.** Mapas de Aptidão realizados com a metodologia do Geodesign para a Staten Island nos Estados Unidos da America. Fonte: McHarg, 1995. . . . . 40

**Figura 28.** Ilustração com os Atores, a equipe de Geodesign e o Framework para o Geodesign. Fonte: Steinitz, 2012. . . . . 42

**Figura 29.** Fluxograma com o método de planejamento para cidades resilientes e sustentáveis segundo Novotny. Fonte: Novotny, 2010. . 44

**Figura 30.** Mapa mundi feito pelo IBGE: coloca o Brasil no centro do mundo. Fonte: <<https://www.estadao.com.br/ciencia/ibge-mapa-brasil-atlas-centro-g20-marcio-pochmann-cartografia-nprm/>> Acesso em: 11 maio. 2024. . . . . 44

**Figura 31.** Ilustração com etapas do BIM. Fonte: <<https://www.depi.unicamp.br/implementacao-de-bim-building-information-modeling-na-unicamp/>>. Acesso em: 26 set. 2024. . . . . 45

**Figura 32.** Ilustração da estrutura CIM segundo Beirão. Fonte: Beirão, 2012. . . . . 46

**Figura 33.** Ilustração em 3D de diferentes dados georreferenciados gerados a partir de algoritmo. Fonte: João Pedro Deodato Barreto e autora, 2024. . . . . 50

**Figura 34.** Ilustração do processo de planejamento e decisão com o uso do LIM. De cima para baixo: território, dados georreferenciados, algoritmo, cenários possíveis para discussão, cenário escolhido. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 52

**Figura 35.** Imagens ilustrativas da intervenção proposta para a cidade de Belém do Pará. As transformações com IeA no passar do tempo de cima para baixo. Fonte: Elaborada por João Pedro Deodato, 2023. . 53

## CAPÍTULO 5

**Figura 36.** Resultado produzido pelo algoritmo em relação às áreas com maior propensão a alagamentos em uma determinada região nos anos de 2018, 2020 e 2023 (da esquerda para a direita). Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 55

**Figura 37.** Ilustração das diferentes etapas do algoritmo Tucunaré. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 56

**Figura 38.** Mapas da localização da Bacia do Mata-Fome. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 57

**Figura 39.** Imagens de satélite ilustrando o adensamento da Bacia do Mata-Fome entre 2009 e 2023. Fonte: Google Earth, 2023. . . . . 57

**Figura 40.** Algoritmo completo e suas diferentes etapas, divididas em setores. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 58

**Figura 41.** Área de trabalho do Tucunaré. À esquerda, o programa Rhinoceros, onde os dados são visualizados. À direita, o programa Grasshopper, onde o algoritmo é manuseado e construído. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 58

**Figura 42.** Pequeno agrupamento do algoritmo. Pilhas do algoritmo conectadas da esquerda para a direita. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 58

**Figura 43.** Mapa Hipsométrico da Bacia do Mata-Fome. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 59

**Figura 44.** Mapa do cimento Pluvial na Bacia do Mata-Fome, micro-zona em vermelho. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 59

**Figura 45.** Grupo de funções do algoritmo para o cálculo da vazão. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 60

**Figura 46.** Mapa da área de acúmulo pluvial em vermelho na Bacia do Mata-Fome. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 60

**Figura 47.** Equação de escoamento superficial. Fonte: Silva et al., 2013. . . . . 60

**Figura 48.** Mapas de prioridade de ação com base nos diferentes critérios de análise. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 61

**Figura 49.** Mapa de prioridade de atuação multicritério. Ruas vermelhas possuem maior prioridade segundo o parâmetro híbrido. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 61

**Figura 50.** Mapa com ruas escolhidas para intervenção em Belém do Pará. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 62

**Figura 51.** Resultados quantitativos no ambiente do Grasshopper. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 62

**Figura 52.** Mapas do comportamento da cheia na Bacia do Mata-Fome. Fonte: Elaborada pela autora, 2023. . . . . 62

**Figura 53.** Imagens das habitações em palafitas na Bacia do Mata-Fome. Fonte: Acervo da autora, 2023. . . . . 63

**Figura 54.** Ilustração de proposta de alagados naturais para a Bacia do Mata-fome. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 63

**Figura 55.** Ilustrações com propostas de tipos viários para cenário ideal da Bacia do Mata-Fome. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . . 63

**Figura 56.** Ilustração das diferentes etapas do algoritmo Tucunaré adaptada ao estudo de caso Belém do Pará. Fonte: Elaborado pela autora, 2024. . . . . 64

**Figura 57.** Imagem do workshop LIM no Geodesign South America em 2024. Fonte: Acervo da autora, 2024. . . . . 66

## CAPÍTULO 6

**Figura 58.** Imagem do Tucunaré simplificado utilizado nos workshops. Fonte: Acervo da autora, 2024. . . . . 66

**Figura 59.** Exemplos de mapas produzidos pelos participantes dos workshops LIM. Fonte: Acervo da autora, 2023. . . . . 67

**Figura 60.** Ilustração da seleção dos municípios brasileiros para a segunda fase do Projeto Cidade Presente. Fonte: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/assuntos/noticias-1/conheca-os-municipios-selecionados-para-parceria-com-projeto-dus-da-cooperacao-brasil-alemanha>>. Acesso em: 7 maio. 2024. . . . . 68

**Figura 61.** Imagem do workshop com crianças do território do Bom Jardim realizado pela equipe. Fonte: Acervo da autora, 2024. . . . . 68

**Figura 62.** Mapas da localização de Fortaleza. Fonte: Carvalho, 2023b. . . . . 69

**Figura 63.** Mapas da localização da microbacia do caso Bom Jardim em Fortaleza. Fonte: Carvalho, 2023b. . . . . 69

**Figura 64.** Mapa do cimento pluvial no caso Bom Jardim. Fonte: Carvalho, 2023b. . . . . 69

**Figura 65.** Mapa da análise multicritério com as vias prioritárias para IeA. Fonte: Carvalho, 2023b. . . . . 70

**Figura 66.** Mapa da proposição de implantação de IeAs pelos pesquisadores. Fonte: Carvalho, 2023b. . . . . 70

**Figura 67.** Ilustração do projeto preliminar de implantação de SBN pela equipe do Projeto Caminhos Verdes e Azuis no trecho de canal do Rio Maranguapinho. Fonte: Acervo interno do IPPLAN, 2024. . . . . 70

**Figura 68.** Mapa do levantamento de resíduos sólidos na região de estudo no Grande Bom Jardim. Fonte: Produzida pela autora com dados do IPPLAN, 2024. . . . . 72

**Figura 69.** Imagem de trecho de riacho onde o levantamento de resíduos sólidos foi realizado no caso Bom Jardim. Fonte: Acervo da autora, 2024. . . . . 72

**Figura 70.** Ilustração das diferentes etapas do algoritmo Tucunaré adaptada ao estudo de caso Bom Jardim. Fonte: Elaborado pela autora, 2024. . . . . 73

**Figura 71.** Mapa do município de Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024. . . . . 74

**Figura 72.** Mapa do distrito-sede do município de Sobral. Fonte: Elaborado pelo consórcio, 2024. . . . . 74

**Figura 73.** Ilustração dos jardins filtrantes de Sobral. Fonte: Elaborado pelo consórcio, 2024. . . . . 74

**Figura 74.** Mapa de curvas de nível de Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024. . . . . 75

**Figura 75.** Mapa hipsométrico de Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024. . . . . 75

**Figura 76.** Mapa do cimento pluvial de Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024. . . . . 75

**Figura 77.** Mapa de nanobacias do distrito-sede de Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024. . . . . 76

**Figura 78.** Mapas de diferentes camadas de análise no distrito-sede, em Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024. . . . . 76

**Figura 79.** Tabela de indicadores para criação de mapas de adequabilidade para o distrito-sede de Sobral e pesos por critério. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024. . . . . 77

**Figura 80.** Mapa de adequabilidade de jardins de chuva para o distrito-sede de Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024. . . . . 77

**Figura 81.** Mapa de adequabilidade de alagados para o distrito-sede de Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024. . . . . 77

**Figura 82.** Mapa de adequabilidade de biovaletas para o distrito-sede de Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024. . . . . 77

**Figura 83.** Mapa de adequabilidade de canteiro pluvial para o distrito-sede de Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024. . . . . 77

**Figura 84.** Ilustração das diferentes etapas do algoritmo Tucunaré adaptada ao estudo de caso do distrito-sede de Sobral. Fonte: Elaborado pela autora, 2024. . . . . 78

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> Termos-chave da pesquisa em resiliência. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . .	25
<b>Tabela 2</b> Termos e definições para infraestruturas que fornecem serviços ecossistêmicos. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . .	32
<b>Tabela 3</b> Termos e definições das Infraestruturas Azuis. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . .	36
<b>Tabela 4</b> Metodologia e Resultados dos artigos considerados relevantes para o entendimento do LIM. Fonte: Elaborada pela autora, 2024. . . . .	47
<b>Tabela 5</b> Indicadores levantados para o Projeto Caminhos Verdes e Azuis. Fonte: Elaborada pela autora, 2024 . . . . .	71

## LISTA DE SIGLAS

BIM - Modelagem da Informação da Construção - <i>Building Information Modeling</i>
CAD - <i>Design Assistido por Computador</i>
CIM - Modelagem da Informação da Cidade - <i>City Information Modeling</i>
DUS - Projeto Desenvolvimento Urbano Sustentável, posteriormente nomeado “Projeto Cidade Presente”
IeA - Infraestrutura Azul
IeV - Infraestrutura Verde
IPLANFOR - Instituto de Planejamento de Fortaleza
LIM - Modelagem da Informação Aplicada à Paisagem - <i>Landscape Infomation Modeling</i>
ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
MI - Modelagem da Informação
IeA - Infraestrutura Azul
MpM - Melhor Prática de Manejo
PIRF - Plano Integrado de Regularização Fundiária
RNL - Revisão Narrativa da Literatura
SBN - Solução Baseada na Natureza / NBS - <i>Nature-based Solution</i>
SE - Serviços Ecossistêmicos - <i>Ecossistem Services</i>
SIG - Sistema de Informação Geográfica
UFC - Universidade Federal do Ceará
ZEIS - Zona Especial de Interesse Social

# SUMÁRIO

<b>Capítulo 1</b> Introdução	09	<b>Capítulo 6</b> Validação do Algoritmo	65
<b>Tópico 1.1</b> Antecedentes	10	<b>Tópico 6.1</b> Workshop LIM	66
<b>Tópico 1.2</b> Justificativa	13	<b>Tópico 6.2</b> O Caso Bom Jardim	68
<b>Tópico 1.3</b> Objetivo Principal	15	<b>6.2.1</b> O Contexto	68
<b>1.3.1</b> Objetivos Específicos	15	<b>6.2.2</b> O Uso do Algoritmo	69
<b>Capítulo 2</b> Metodologia de Pesquisa	16	<b>6.2.3</b> Levantamento de Indicadores	71
<b>Tópico 2.1</b> Objetivo Específico 1	17	<b>6.2.4</b> Considerações Preliminares do Caso	72
<b>Tópico 2.2</b> Objetivo Específico 2	18	<b>Tópico 6.3</b> O Caso Sobral	74
<b>Tópico 2.3</b> Objetivo Específico 3	19	<b>6.3.1</b> O Contexto	75
<b>Capítulo 3</b> A Natureza como Infraestrutura de Resiliência	21	<b>6.3.2</b> O Uso do Algoritmo no Diagnóstico	75
<b>Tópico 3.1</b> A Cidade Resiliente como Objetivo do Mundo Contemporâneo	22	<b>6.3.3</b> O Uso do Algoritmo na Replicabilidade	76
<b>3.1.1</b> Resiliência Urbana a Inundações	27	<b>6.3.3</b> Considerações Preliminares do Caso	76
<b>Tópico 3.2</b> A Natureza como Infraestrutura e seus Muitos Termos	30	<b>Capítulo 7</b> Conclusão	79
<b>3.2.1</b> A Natureza como Infraestrutura de Drenagem	34	<b>Tópico 7.1</b> Considerações Finais	83
<b>3.2.2</b> Considerações Preliminares	38	<b>Capítulo 8</b> Bibliografia	85
<b>Capítulo 4</b> Modelagem da Informação Aplicada à Paisagem	39		
<b>Tópico 4.1</b> Uma Metodologia para o Design Urbano Resiliente	40		
<b>Tópico 4.2</b> Caracterização do LIM	45		
<b>4.2.1</b> Considerações Preliminares	53		
<b>Capítulo 5</b> O Algoritmo Tucunaré	54		
<b>Tópico 5.1</b> O Artefato	55		
<b>5.1.1</b> O Caso da Bacia do Mata-Fome	57		
<b>5.1.2</b> Programas e Inputs	57		
<b>5.1.3</b> Análise do Comportamento Pluviométrico	59		
<b>5.1.4</b> Delimitação da Microzona de Atuação	60		
<b>5.1.5</b> Cálculo de Vazão	60		
<b>5.1.6</b> Seleção dos Locais Estratégicos para IeA	61		
<b>5.1.7</b> Avaliação do Impacto da Intervenção	62		
<b>Tópico 5.2</b> Considerações Preliminares	62		

# CAPÍTULO 1

# INTRODUÇÃO

## Tópico 1.1

### ANTECEDENTES

Esta dissertação é fruto de um trabalho contínuo de pesquisa, ensino e extensão que teve início em 2018 com o uso de Modelagem Paramétrica para a renaturalização de um trecho de rio na Bacia do Jaguá, na cidade de São Paulo. A partir deste ponto, iniciamos nossa jornada de exploração do *Landscape Information Modeling* (LIM) ou, Modelagem da Informação Aplicada à Paisagem, em tradução livre, que foi primeiramente mencionada em pesquisas no Brasil por Sandre & Pellegrino (2021). A seguir, apresentamos de forma sucinta algumas dessas explorações e experiências que culminaram nesta dissertação.

#### PROJETO DE RENATURALIZAÇÃO DE TRECHO DO RIO JAGUARÉ - 2018

A instalação de retenção para um trecho do Rio Jaguá, na cidade de São Paulo, foi modelada e avaliada como protótipo, considerando sua capacidade volumétrica e seu desempenho tanto como elemento paisagístico quanto como uma Melhor Prática de Manejo (MpM). A modelagem paramétrica assistida por computador foi a metodologia empregada para investigar a interação entre desempenho e *design* (Figura 1). Esta abordagem proporcionou uma maior flexibilidade no projeto, inspirada pelas paisagens de rios anastomosados, adaptando-se à dinâmica variada dos fluxos de água, desaceleração e fitorremediação. Este experimento ilustrou a capacidade da modelagem paramétrica ao calcular o volume de retenção, além de representar a nova morfologia tridimensional, alcançando uma abordagem prospectiva na arquitetura paisagística (Moura *et al.*, 2018).

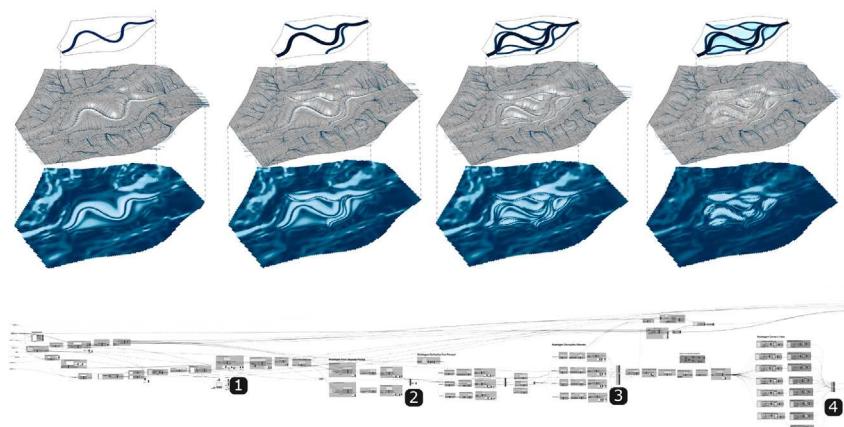
#### PIRF PICI, BOM JARDIM E POÇO DA DRAGA - 2019

Em 2019, a pesquisa pôde ser posta em prática o Plano Integrado de Regularização Fundiária (PIRF), projeto realizado pela Prefeitura de Fortaleza em parceria com a Universidade Federal do Ceará e outras entidades públicas e privadas. Nele, um algoritmo paramétrico de simulação pluvial foi utilizado para o diagnóstico de drenagem das regiões estudadas. Os PIRF têm como objetivo a regularização das Zona Especial de Interesse Social (ZEIS) de Fortaleza.

Primeiramente, foram realizados diagnósticos e, posteriormente, propostas urbanísticas para cada comunidade. Trata-se de um trabalho de flexibilização das normas da cidade, em que se ajusta as comunidades citadas à realidade social e econômica de cada território sem prejudicar, contudo, a dignidade e a qualidade de vida das famílias ou o bem-estar ambiental da cidade. Vale ressaltar que os PIRF foram feitos de forma participativa e realizados juntamente com os representantes das comunidades (Barreira *et al.*, 2019).

#### TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - 2020

Considerando os desafios impostos pelas mudanças climáticas e suas consequências, o trabalho de conclusão de curso citado neste tópico apresentou um estudo de caso que explorou o conceito de Modelagem da Informação Aplicada à Paisagem - *Landscape Information Modeling*



**Figura 1.** Algoritmo utilizado no Projeto do córrego Jaguá, na cidade de São Paulo. Fonte: Elaborada pela autora, 2020.



**Figura 2.** Projeto de renaturalização de riacho na Comunidade do Poço da Draga, em Fortaleza. Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

(LIM) como uma ferramenta de análise e de tomada de decisão no projeto paisagístico, a fim de avaliar estratégias de prevenção de inundações para uma ZEIS (Figura 2). A teoria LIM fornece uma nova abordagem para o projeto urbano e paisagístico e emprega sistemas da modelagem da informação de forma a analisar dados ambientais como *inputs* e propor simulações a partir das quais o cenário ideal pode ser alcançado.

#### ACELERADOR DE SBN EM MARANGUAPE, CEARÁ - 2023

A Prefeitura de Maranguape, com o projeto do Parque Pirapora, participou, no ano de 2023, do Acelerador de Soluções Baseadas na Natureza promovido pela WRI<sup>1</sup> Brasil. Nós contribuímos com a utilização de modelagem paramétrica no diagnóstico da microbacia do Rio Pirapora. O rio enfrenta diversos problemas socioambientais decorrentes da urbanização desregrada, como ocupações em áreas de risco, poluição, alagamentos de residências e danos à biodiversidade. Para enfrentar essas situações, o projeto do Parque Pirapora propõe a implementação de um conjunto de SBN aplicadas ao longo do sistema infraestrutural do rio.

Assim, com jardins de chuva, jardins biofiltrantes, bacias de evapotranspiração e fossas biodigestoras, o projeto realizará o manejo sustentável de águas pluviais, a revitalização do rio Pirapora, melhorias socioambientais na microbacia e a melhoria da qualidade da água que deságua na Barragem do Rio Maranguapinho, visando torná-la adequada ao consumo, ao mesmo tempo em que se qualifica o espaço urbano adjacente.

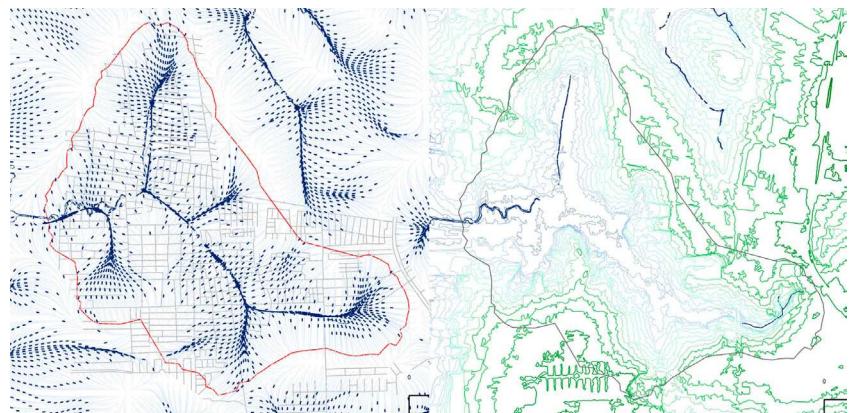
#### ESTUDOS DA BACIA DO MATA-FOME - 2023

O desenvolvimento urbano da Região Metropolitana de Belém priorizou o crescimento construtivo em detrimento dos processos ambientais e da diversidade social, resultando na redução da cobertura vegetal e em impactos climáticos. Uma pesquisa foi conduzida para identificar oportunidades de criação de uma paisagem funcional na área de expansão da cidade, focando na Bacia Hidrográfica do Mata-Fome como exemplo (Figura 3).

Utilizando geoprocessamento, cálculos matemáticos e modelagem 3D, demonstrou-se a viabilidade de integrar soluções baseadas na natureza à infraestrutura convencional, visando preservar aspectos culturais e mitigar impactos ambientais. Concluiu-se que é possível manter áreas vegetadas e permeáveis, promovendo benefícios socioambientais e econômicos, além de contribuir para a adaptação às mudanças climáticas nas cidades amazônicas (Alves *et al.*, 2023b).

#### EXPOSIÇÃO CORREDOR CULTURAL - 2023

A exposição “Corredor Cultural” propôs uma série de renovações para uma das principais avenidas da cidade de Fortaleza, a Avenida da Universidade, visando torná-la mais amigável para pedestres, empregando soluções baseadas na natureza. A transformação permite que os pedestres utilizem a avenida como uma extensão dos prédios culturais situados ao longo dela, como teatros, universidades, museus etc.



**Figura 3.** Imagens da simulação pluvial e das curvas de nível da microbacia do Mata-Fome, em Belém do Pará. Fonte: Elaborada pela autora.

<sup>1</sup> WRI Brasil é um instituto de pesquisa, com atuação global em estudos e soluções para sustentabilidade, clima e comunidades resilientes. Atua em parceria com governos, empresas, academia e sociedade civil, parte do World Resources Institute (WRI).

O projeto foi apresentado em formato de exposição museológica, incluindo elementos gráficos físicos, componentes digitais e experiências interativas. A exposição engajou com sucesso diversos *stakeholders* e a população, demonstrando-se acessível a diferentes usuários. Tecnologias de XR (Realidade Estendida) foram consideradas importantes ferramentas para a negociação entre os envolvidos no projeto, visando soluções mais inclusivas e resilientes para desafios urbanos crescentes.



**Figura 4.** Exposição Corredor Cultural Benfica, no Museu de Arte da UFC em outubro de 2023. Fonte: Acervo da autora, 2023.

## Tópico 1.2

# JUSTIFICATIVA

A paisagem urbana é uma mistura complexa de elementos naturais e artificiais, em que a distinção entre meio ecológico e infraestrutura se torna cada vez mais tênue. A noção de “natureza primeira” cede lugar à “natureza segunda”, um ambiente moldado pela intervenção humana e pelas exigências da vida social (Santos, 1988). Nesse sentido, a paisagem pode ser interpretada como um registro histórico, no qual camadas de formas e significados se acumulam ao longo do tempo. Essas transformações contínuas na paisagem urbana refletem a evolução da sociedade e sua relação com o ambiente.

À medida que nos distanciamos do mundo natural e nos envolvemos em um ambiente artificial, surge a necessidade de repensar nossos conceitos de paisagem e infraestrutura (Santos, 1991). O estudo da paisagem urbana, portanto, adquire uma importância semelhante a de uma escavação arqueológica, em que a análise horizontal revela as estruturas e funções atuais, enquanto a leitura vertical expõe as origens e transformações ao longo da História (Santos, 1991).

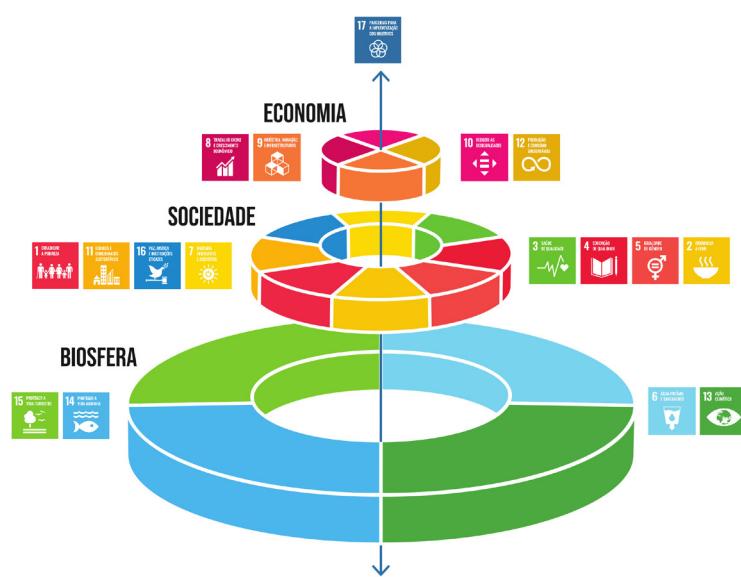
Desde os tempos das antigas cidades romanas, quando as primeiras infraestruturas urbanas massivas surgiram (Novotny, 2010), pouco mudou na abordagem do gerenciamento dos recursos hídricos para sustentar a vida humana. As cidades são moldadas e remodeladas para atender às demandas de seus habitantes. No entanto, essa relação predatória com o espaço urbano resultou em uma miríade de consequências indesejáveis. A poluição do ar e da água tornou-se uma sombra perene sobre a qualidade de vida nas cidades, enquanto ilhas de calor brotam em seus centros devido à urbanização desenfreada (Spirn, 1995). A escassez de espaços verdes para recreação e educação exacerbou a desconexão entre os habitantes urbanos e a natureza. Corpos d’água, quando presentes, frequentemente se transformam em reservatórios tóxicos, inadequados para qualquer forma de interação humana (Spirn, 1995) (Figura 5), e, à medida que as mudanças climáticas amplificam esses problemas, os desafios enfrentados pelos planejadores urbanos e gestores se multiplicam.

Enquanto as repercussões dessas questões são sentidas, o poder público brasileiro elabora relatórios que delineiam os objetivos para o futuro das cidades. Em 2015, dois documentos importantes foram produzidos: o Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres, resultado da Terceira Conferência Mundial sobre a Redução do Risco de Desastres (ONU, 2015), e a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável (IBGE, 2018).

Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) provenientes da Agenda 2030 (Figura 6) passaram a integrar todas as políticas urbanas que visam o tripé da sustentabilidade (dimensões social, econômica e ambiental). A natureza não é mais considerada uma fonte quase inesgotável de recursos disponíveis para as sociedades humanas. Nos ODS, ela adquire um papel fundamental. Tais objetivos convidam-nos a encarar o desenvolvimento como uma questão ética. Eles demandam que os projetos de infraestrutura, para além dos parâmetros de eficiência e segurança, sejam definidos por seus propósitos, objetivos e impactos na vida social. Isso implica não apenas na identificação dos beneficiários dos diversos projetos, mas também dos processos e, principalmente, dos atores fundamentais que os orientam (Abramovay, 2022).



**Figura 5.** Mancha preta em descida de tubulação de drenagem urbana para o mar da cidade de Fortaleza em 2021. Fonte: <<https://www.opovo.com.br/noticias/fortaleza/2021/02/16/chuva-carrega-lixo-do-riacho-maceio-e-deixa-manca-escura-na-praia-do-mucuripe--veja-video.html>>. Acesso em: 6 maio. 2024.



**Figura 6.** Bolo de casamento dos ODS que ilustra a interdependência entre eles. Fonte: Azote, 2020. <<https://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2016-06-14-the-sdgs-wedding-cake.html>>. Acesso em: 6 maio. 2024.

Outro documento nacional que articula de maneira eficaz as demandas das cidades atuais e futuras é a Carta Brasileira para Cidades Inteligentes (BRASIL, 2020), apresentada pelo Ministério do Desenvolvimento Regional. Baseada no conceito internacional de *Smart Cities* (Cidades Inteligentes), ela enfatiza não apenas o desenvolvimento urbano sustentável, mas também salienta a transformação digital como um elemento fundamental para alcançar esse objetivo. Nos seus princípios orientadores, a Carta destaca as Soluções Baseadas na Natureza (SBN) como ferramentas essenciais para a preservação do meio ambiente. Além disso, ressalta a integração dos aspectos urbanos e digitais por meio da colaboração entre diferentes setores e disciplinas científicas, visando combinar tecnologias digitais e sociais para melhorar a qualidade de vida nas cidades.

As SBN foram introduzidas em 2008 pelo Banco Mundial (Herzog *et al.*, 2022). O conceito surgiu da necessidade de adotar abordagens inovadoras na gestão dos sistemas naturais, visando equilibrar os benefícios para a natureza e para a sociedade. A eficácia dessas soluções é avaliada pelos Serviços Ecossistêmicos (SE), os quais abrangem os benefícios proporcionados pelos ecossistemas naturais às comunidades (Bush & Doyon, 2019). De acordo com Marques *et al.* (2021, p. 23), “Para que uma solução seja considerada SBN, é necessário que promova múltiplos benefícios à sociedade e aumente a biodiversidade”. Dessa forma, o termo SBN é um conceito amplo que abrange uma variedade de soluções materiais e imateriais para as cidades, explorando a natureza como parte integrante da infraestrutura urbana (Figura 7). Tais soluções apresentam nuances que podem variar entre diferentes autores e abordagens.

Em contraponto, as cidades brasileiras, em sua maioria, são regidas por planos diretores<sup>2</sup> baseados em zoneamentos generalistas, que definem parâmetros estáticos para a ocupação urbana (Brasil, 2001). Além disso, esses planos são atualizados apenas a cada 10 anos, criando um intervalo de estagnação em que estudos e alterações não são realizados de forma abrangente e, muitas vezes, não acompanham demandas urgentes ou eventos imprevistos (Freitas, 2016). Diante do cenário de urgência climática e da necessidade de infraestruturas urbanas inovadoras e resilientes, o planejamento urbano baseado em planos estáticos revela-se insuficiente para abordar essas questões (Freitas, 2016).

Historicamente, os mapas têm sido uma ferramenta fundamental para registrar, apresentar e comunicar informações no planejamento urbano. MacHarg (1995), em sua obra “*Design with Nature*”, foi precursor na concepção do projeto da paisagem, introduzindo uma metodologia inovadora para o planejamento ecológico. Com o avanço tecnológico, essas representações cartográficas ganharam ainda mais potencial para gerar dados e conhecimento (Freitas *et al.*, 2016; Lima, 2017). Esta progressão resultou na metodologia do Geodesign (Steinitz, 1990), a qual utiliza Sistemas de Informação Geográfica para processar dados de forma rápida e eficiente, além de explorar diferentes cenários de atuação. Atualmente, os projetos para paisagens responsivas (Cantrell, 2016) utilizam modelagem paramétrica para



**Figura 7.** Ilustração com os parâmetros globais para o uso de SBN. Fonte: IUCN, 2020. <[https://portals.iucn.org/library/node/49070?fbclid=IwAR2S5\\_3uZPxGZ\\_yfY9C-tYUhBok4pc74quKtPk-pb4RuF6WBAVYTkjF1SFnU](https://portals.iucn.org/library/node/49070?fbclid=IwAR2S5_3uZPxGZ_yfY9C-tYUhBok4pc74quKtPk-pb4RuF6WBAVYTkjF1SFnU)>. Acesso em: 6 maio. 2024.

<sup>2</sup> Um plano diretor é um instrumento básico da política urbana utilizado, no Brasil, para orientar o desenvolvimento e o ordenamento territorial de um município. Ele estabelece diretrizes para o uso e a ocupação do solo, buscando organizar o crescimento urbano de forma sustentável, promover a qualidade de vida da população e garantir o direito à cidade para todos (Brasil, 2001).

conceber uma paisagem urbana não estática, na qual o ambiente urbano interage de forma dinâmica com a paisagem natural em constante mutação.

São necessários novos paradigmas no planejamento urbano, especialmente no que diz respeito à paisagem. A busca por uma relação mais harmoniosa entre a urbanidade e a natureza tornou-se uma prioridade incontornável. É nesse contexto que se insere a presente dissertação, a qual visa explorar os fundamentos da resiliência urbana. Nossa foco recai sobre duas vertentes chaves: as Infraestruturas Azuis como ferramentas de intervenção e a Modelagem da Informação como ferramenta para enfrentar os desafios das metrópoles contemporâneas.

## Tópico 1.3

### OBJETIVO PRINCIPAL

A pesquisa se concentra na investigação das Soluções Baseadas na Natureza (SBN) como instrumentos para fortalecer a resiliência das cidades diante das inundações, utilizando a Modelagem da Informação Aplicada à Paisagem (LIM) como ferramenta de projeto.

Através de estudos de caso nos estados do Ceará e do Pará, a pesquisa pretende compreender a viabilidade de adaptar essas soluções a diferentes contextos urbanos no Brasil. **O objetivo principal é analisar como as Soluções Baseadas na Natureza (SBN) podem atuar como agentes de resiliência urbana frente às inundações, considerando as características geográficas, sociais e culturais de cada território. Além disso, busca-se explorar a Modelagem da Informação da Paisagem (LIM) como uma ferramenta capaz de responder às demandas globais sem desconsiderar as particularidades locais.**

#### 1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para abordar o objetivo geral, essa dissertação foi estruturada em três capítulos, cada um com um objetivo específico. Esses capítulos exploram diferentes aspectos do tema central e, juntos, estabelecem a base metodológica, a qual será detalhada no próximo capítulo.

1. Discutir teoricamente a natureza como infraestrutura (SBN, IEVs, LID etc.) na promoção da resiliência urbana às inundações nas cidades brasileiras, visando determinar se essas soluções são adequadas para atingir tal objetivo. **Tratado no capítulo 3.**
2. Investigar abordagens metodológicas para o planejamento da paisagem com foco na resiliência, tendo em vista o LIM como uma ferramenta promissora para fortalecer e potencializar a eficácia das SBNs para ambientes urbanos resilientes à inundações. **Tratado no capítulo 4.**
3. Desenvolver uma ferramenta baseada em modelagem da informação para o projeto da paisagem centrado nas SBN como infraestruturas. Este modelo será concebido para incorporar tanto o diagnóstico das condições existentes quanto a prescrição de intervenções específicas. **Tratado no capítulo 5 e no capítulo 6.**

As metodologias adotadas para conduzir esta dissertação são fundamentadas nos três objetivos específicos. Apresentaremos tais caminhos em tópicos sequenciais, no entanto, é importante ressaltar que foram processos simultâneos que frequentemente se complementaram ao longo de todo o desenvolvimento do estudo.

# CAPÍTULO 2

# METODOLOGIA

# DE PESQUISA

## Tópico 2.1

### OBJETIVO ESPECÍFICO 1

Ao iniciar o estudo da natureza como infraestrutura, observou-se que o conceito se baseia fortemente nos serviços ecossistêmicos para cidades resilientes. Contudo, poucas vezes esses termos são aprofundados ou sequer referenciados em textos contemporâneos que tratam de SBN ou Infraestruturas Verdes e Azuis. Tendo em vista tal cenário, foi conduzida uma pesquisa bibliográfica regressiva para compreender as bases conceituais do termo “resiliência” dentro da abordagem de SBN como ferramentas. O resultado desse processo foi uma definição clara e diretrizes para uma maior resiliência urbana às inundações.

A Revisão Narrativa da Literatura (RNL) teve início a partir de uma inquietação relacionada à ausência de referências consistentes do termo “resiliência” ou “cidade resiliente” em artigos acadêmicos e relatórios nacionais sobre as SBN. Em alguns casos, a referência conceitual do termo sequer é mencionada ou o mesmo é deixado sem explicação, o que cria margem para que se torne vazio de significado devido à sua utilização excessiva e indiscriminada.

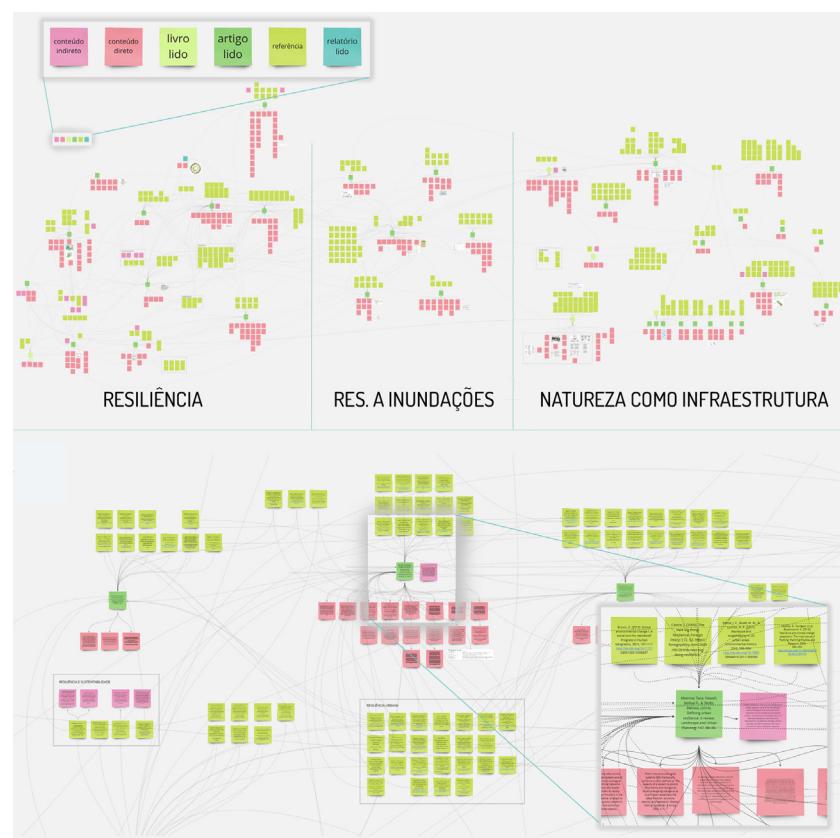
A partir disso, foi iniciada uma revisão regressiva dos artigos principais que a utilizaram até o estabelecimento da referência inicial, que, no caso, foi o artigo científico “*Resilience and stability of ecological systems*” escrito por Holling, em 1973, no qual ele aborda o termo à luz do estudo dos ecossistemas biológicos. Então, tomando as referências mútuas entre os artigos, os textos mais relevantes foram elencados e lidos em profundidade para o entendimento do tema.

O resultado deste estudo não linear foi o organograma ilustrado na Figura 8, em que as fichas formam uma teia de alimentação e retroalimentação entre os diferentes artigos e tópicos. A pesquisa das referências gerou blocos de artigos que tratam de temas similares, como resiliência urbana, resiliência e sustentabilidade, e infraestrutura verde.

Na teia, as fichas verde escuro representam os artigos lidos em profundidade e, ligados a elas, na cor rosa, estão os tópicos considerados relevantes de cada artigo. Concomitantemente, para cada ficha verde escuro, foram ligadas as fichas verde claro, que são trabalhos relevantes não lidos. À medida que o estudo progrediu, fichas verde claro se tornaram verde escuro. Também de forma concomitante, esses dados foram transferidos para um formato de planilha tradicional. Por fim, 39 artigos foram lidos em profundidade e, relacionados a eles, mais de 300 outros artigos foram catalogados. A Figura 8 mostra em maior detalhe essa dinâmica.

Em seguida, foram discutidos os diferentes termos que englobam o conceito de paisagem enquanto infraestrutura, considerando que a pesquisa aborda esse tema, desde o final do século XX, com diferentes nomenclaturas e definições. Posteriormente, foram definidas a Solução Baseada na Natureza e a Infraestrutura Azul como termos-chave desta pesquisa.

Por fim, concluímos a maneira em que as Infraestruturas Azuis podem auxiliar no aumento da resiliência urbana. Esta fase corresponde ao Capítulo 3 da dissertação, o qual aborda as Soluções Baseadas na Natureza dentro do contexto da drenagem urbana na busca por cidades



**Figura 8.** Organograma desenvolvido no programa Miro para a RNL. Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

mais resilientes. Sendo assim, todos os termos e contextos aqui mencionados estão relacionados a esse recorte conceitual e geográfico. O uso das soluções baseadas na natureza em si pode se dar em situações diferentes, considerando escalas regionais e tratando de questões não urbanas ou de outros tipos de assentamento humano. Contudo, nesta pesquisa, essas outras escalas não serão abordadas a fundo.

## Tópico 2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 2

A fim de compreender a metodologia de projeto da paisagem e pretendendo explorar o objetivo específico 2 da pesquisa, foi realizado um estudo de livros de autores consagrados, começando com o projeto-módelo de McHarg (1995), da década de 1970, e culminando com as paisagens responsivas de Cantrell (2016). Assim, foram identificados os pontos principais de cada uma das metodologias de projeto.

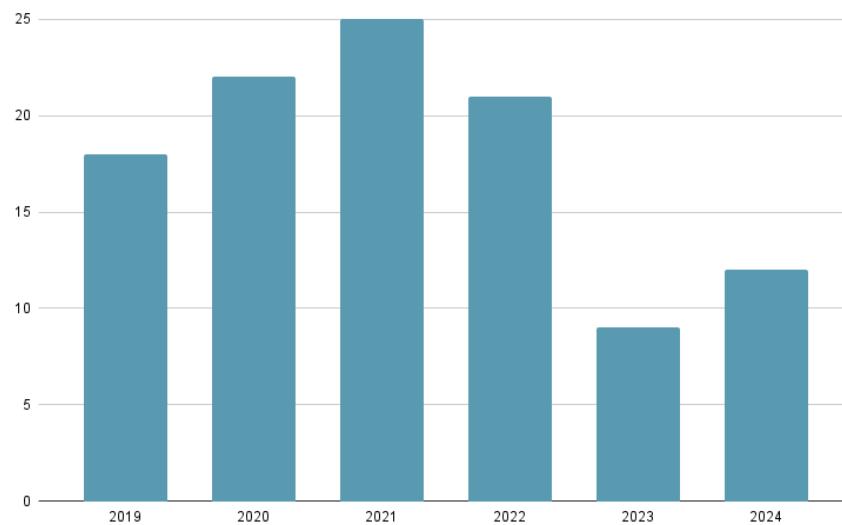
Em seguida, foi realizada uma revisão da literatura sobre Modelagem da Informação Aplicada à Paisagem (LIM), a qual seguiu os seguintes passos:

Primeiramente, uma **revisão não linear** foi conduzida. Nessa fase, foram identificados sete artigos de revistas considerados relevantes para o entendimento do tema, os quais trouxeram, principalmente, referências de trabalhos de pesquisa anteriores à dissertação considerados relevantes, mas que potencialmente não seriam encontrados em uma revisão sistemática. Já em um segundo momento, foi realizada uma **revisão sistemática da literatura**, focada nos últimos cinco anos (2019-2024), utilizando o **portal internacional Science Direct** como fonte.

Para refinamento da busca no referido site, foram estabelecidos os seguintes critérios: a) artigos publicados entre 2019 e 2024; b) exclusivamente artigos de pesquisa; c) idioma em inglês ou português; d) publicações em periódicos revisados por pares; e) exclusão de revistas com temas não correlatos como matemática e agricultura. Como palavras-chave foram utilizadas: “LIM”, “*Landscape Information Modeling*” e “*Landscape Parametric Modeling*”. O termo “LIM” foi posteriormente removido por não gerar artigos relacionados ao tema trabalhado. Nesta busca, foram encontrados 1318 resultados, com destaque para o termo “*Landscape Information Modeling*” que resultou em 1231 artigos (Figura 9).

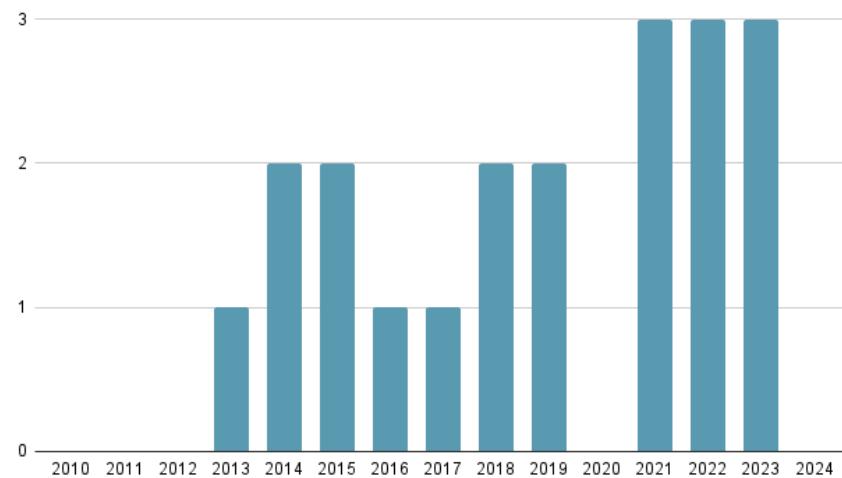
Além disso, em um terceiro momento, uma **revisão sistemática da literatura** foi conduzida no **portal nacional Capes Periódicos**. Nessa instância, foram aplicados os seguintes filtros: a) apenas artigos de pesquisa; b) idioma em inglês ou português; c) publicações em periódicos revisados por pares d) publicações nacionais. Não houve restrição quanto ao ano de publicação devido ao menor número de periódicos resultantes da pesquisa neste portal, considerado mais relevante para o escopo do trabalho, dada sua natureza nacional. As palavras-chave utilizadas foram: “LIM”, “*Landscape Information Modeling*”, “Modelagem da Informação da Paisagem”, “Modelagem da Informação Aplicada à Paisagem” e “*Landscape Parametric Modeling*”.

### ARTIGOS SELECIONADOS EM SCIENCE DIRECT



**Figura 9.** Gráfico de quantidade de referências encontradas por ano na plataforma Science Direct para a RSL. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

### ARTIGOS SELECIONADOS EM CAPES PERIÓDICOS



**Figura 10.** Gráfico de quantidade de referências encontradas por ano na plataforma Capes Periódicos para a RSL. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Notavelmente, as palavras “LIM” e “Modelagem da Informação Aplicada à Paisagem” não produziram resultados relevantes e foram, portanto, excluídas da revisão. Assim, nesta segunda busca foram encontrados 334 artigos, com destaque para o termo “*Landscape Information Modeling*” que resultou em 307 artigos (Figura 10).

Após o levantamento inicial de artigos, procedeu-se a uma **seleção subjetiva com base na leitura dos títulos e resumos**. Neste estágio, foram selecionados os artigos que abordavam a modelagem da informação da paisagem urbana, uma vez que este é o foco específico deste trabalho. A exceção foi feita para artigos que, mesmo não sendo diretamente relacionados às áreas urbanas, empregavam metodologias de diagnóstico ou projeto consideradas aplicáveis em ambientes urbanos. Observou-se uma expressiva quantidade de estudos que tratavam da modelagem da informação em contextos como florestas e zonas agrícolas. Contudo, é importante ressaltar que este trabalho concentra-se na aplicação da modelagem da informação em cidades.

A revisão desses dois portais resultou em 128 artigos provenientes de diferentes revistas. O gráfico a seguir evidencia um aumento na exploração acadêmica dessa temática no cenário nacional, especialmente a partir do ano de 2013.

Foram **elencados artigos pontuais considerados pertinentes** para o presente trabalho, considerando o tema, o recorte de estudo e a abordagem metodológica que serão apresentados no Capítulo 5. Por fim, foi delineado o conceito e os pontos principais da Modelagem da Informação Aplicada à Paisagem, a qual foi utilizada como ferramenta de projeto para os estudos de caso desta pesquisa.

## Tópico 2.3

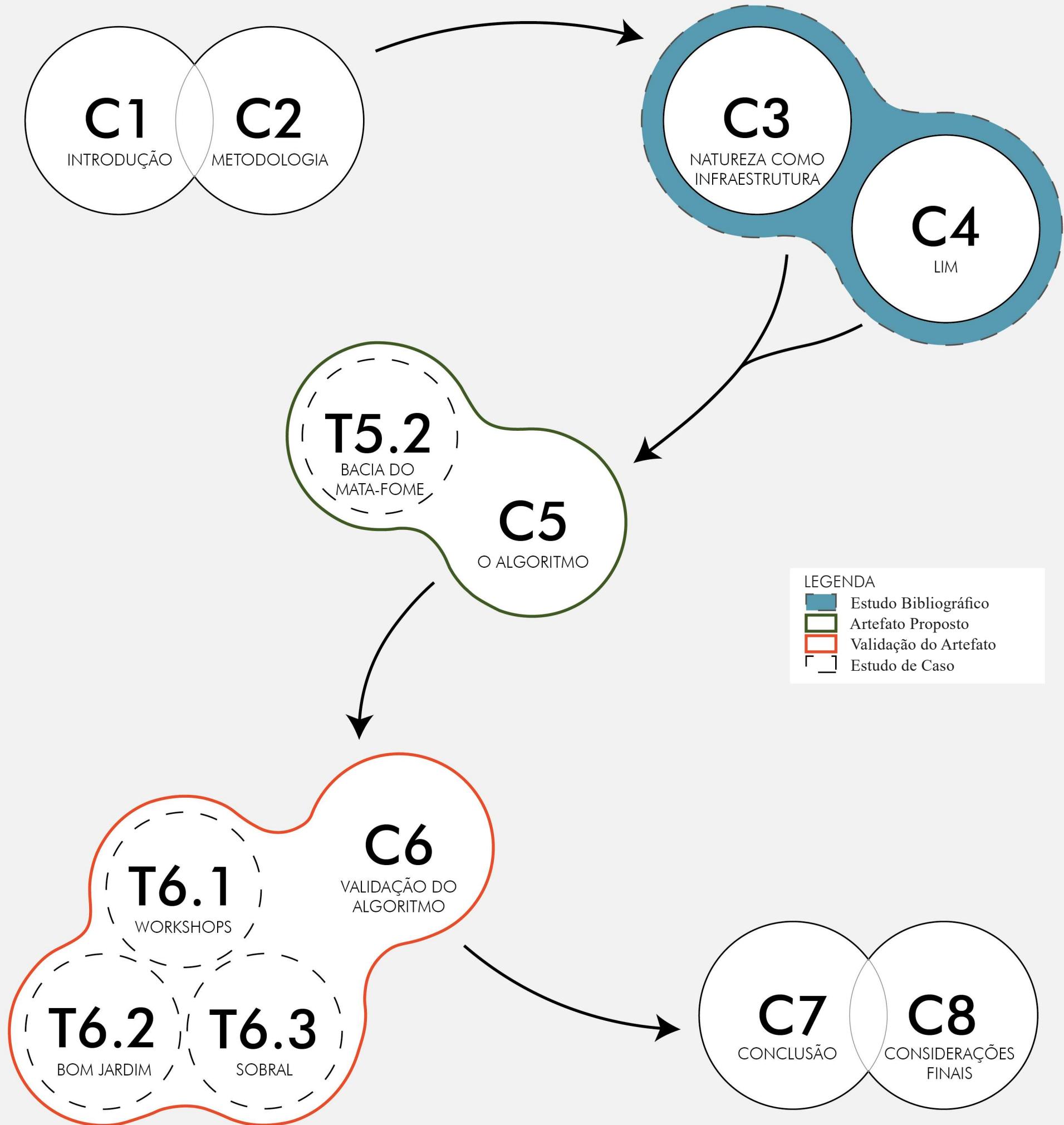
### OBJETIVO ESPECÍFICO 3

Para tratar o objetivo específico 3, foram desenvolvidos dois capítulos. No Capítulo 5, é apresentado um modelo desenvolvido, denominado Tucunaré, que envolve um algoritmo paramétrico voltado para o diagnóstico de microbacias urbanas e a posterior proposição da disposição de Soluções Baseadas na Natureza (SBN). Esse modelo foi aplicado no estudo de caso da Bacia do Mata-Fome, localizada na cidade de Belém do Pará. A partir desse exemplo, foram realizadas as primeiras análises dos resultados obtidos com o modelo em relação aos objetivos iniciais.

Em seguida, foram apresentados três casos distintos nos quais o modelo foi aplicado. O primeiro aborda *workshops* realizados entre 2022 e 2024 em diferentes cenários, destacando sua aplicabilidade quando utilizado por profissionais não especializados.

Os outros dois estudos de caso tratam da aplicação do algoritmo nos territórios do Grande Bom Jardim, em Fortaleza, e nos jardins filtrantes de Sobral. Para cada um dos dois casos, foram feitas considerações preliminares sobre as consequências do uso do Tucunaré em projetos que geralmente não empregam modelagem da informação. O primeiro refere-se a um projeto de *design* urbano sustentável, desenvolvido a partir de um edital nacional, enquanto o segundo envolve uma consultoria para a avaliação do impacto socioambiental dos jardins filtrantes.

Finalizando o corpo principal desta dissertação, o Capítulo 7, intitulado “Conclusão”, apresenta uma recapitulação dos resultados alcançados, analisando-os em relação aos objetivos inicialmente propostos.



**Figura 11.** Ilustração que retrata a metodologia de pesquisa por meio da conexão entre os capítulos e seus referidos temas. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

# CAPÍTULO 3

## A NATUREZA COMO INFRAESTRUTURA DE RESILIÊNCIA

A justificativa em se optar por Soluções Baseadas na Natureza para a mitigação de inundações reside no fato de que essas soluções conferem uma maior resiliência ao contexto em que são inseridas (European Commission, 2015; Bush & Doyon, 2019; Marques *et al.*, 2021). A necessidade de resiliência torna-se evidente em um contexto global dado o aumento significativo de eventos extremos decorrentes das mudanças climáticas (Cohen-Shacham *et al.*, 2019). Esses impactos tendem a ser melhor percebidos nas cidades densamente habitadas, nas quais, por sua vez, residem a maior parte da população brasileira atualmente (Herzog *et al.*, 2022) (Figura 12). Contudo, o uso do termo “resiliência” dentro da academia é abrangente e pode ser aplicado em diversas áreas do conhecimento sem necessariamente alcançar um consenso unânime entre os diferentes pensadores quanto ao seu significado (Meerow *et al.*, 2016b).

Nesse contexto, o tópico a seguir apresentará um breve panorama da evolução do termo “resiliência” no âmbito acadêmico, seguido por uma definição traçada de resiliência urbana contra inundações para os propósitos desta pesquisa.

## Tópico 3.1

### A CIDADE RESILIENTE COMO OBJETIVO DO MUNDO CONTEMPORÂNEO

A referência que marcou o início do emprego atual do termo “resiliência” remonta à década de 1970 no campo da ecologia (Holling, 1973). Holling (1973) ilustrou a existência de múltiplos domínios de estabilidade, ou múltiplas bacias de atração em sistemas naturais, e como esses se relacionam com processos ecológicos, eventos aleatórios (como perturbações) e heterogeneidade de escalas temporais e espaciais. Em seu artigo, Holling (1973) define “resiliência” como a capacidade de persistência de um sistema, ou seja, a capacidade de absorver alterações nas variáveis de estado e controle e nas mudanças de parâmetros e ainda assim persistir.

Posteriormente, Holling (1996) evidencia e conceitualiza a distinção entre resiliência ecológica e resiliência “de engenharia” (Holling, 1996, p. 33, tradução nossa). A resiliência de engenharia, considerada um conceito mais tradicional, foca-se na habilidade de um ecossistema de regressar ao seu estado de equilíbrio prévio após uma perturbação. Por outro lado, a resiliência ecológica entende que os sistemas possuem múltiplos estados de equilíbrio. Nesse caso, a “resiliência” expressa-se na capacidade de um sistema absorver distúrbios antes de alterar sua estrutura e, por conseguinte, o seu estado de equilíbrio (Holling, 1996) (Figura 13).

A resiliência multiequilíbrio passa a ser paradigmática na ecologia e os escritos de Holling (1973, 1996) desencadearam um rico corpo de trabalho pensando uma interface sócio-ecológica (Folke, 2006; Meerow & Newell, 2016a). Até então, as investigações sobre resiliência abordavam os conceitos no contexto da dinâmica de ecossistemas isolados, sem considerar os seres humanos como agentes ativos dentro des-



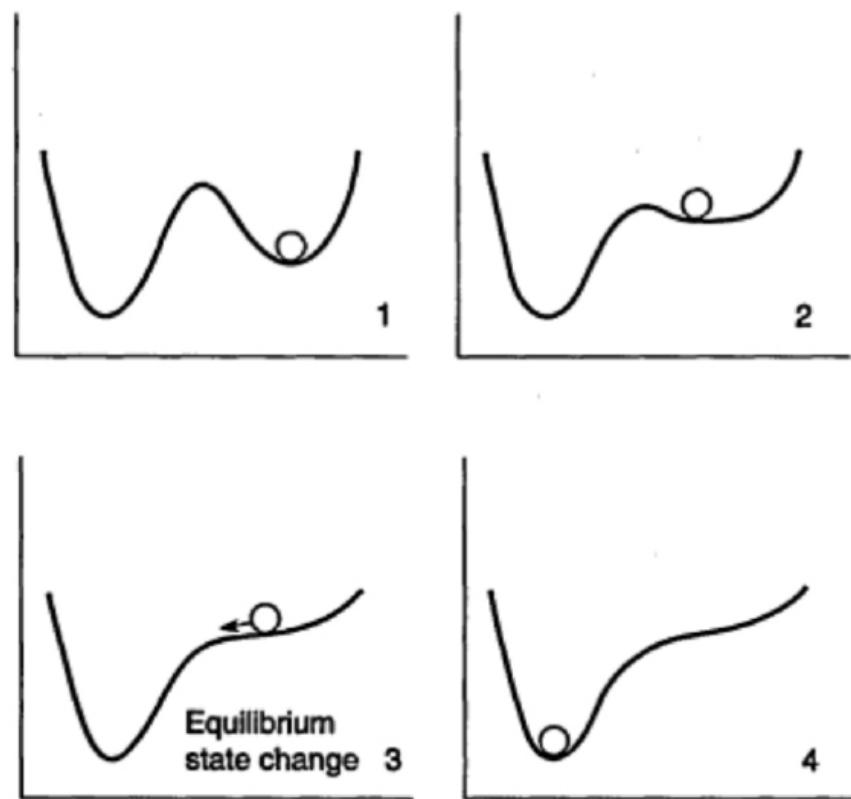
**Figura 12.** Imagens da cheia do rio Guaíba em Porto Alegre, na Rua Voluntários da Pátria em 1941 e 2024. Fonte: <<https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/05/03/enchente-do-guaiba-passa-a-cheia-historica-de-1941-fotos-mostram-comparacao.ghtml>>. Acesso em: 8 maio. 2024.

ses sistemas (Folke, 2006). A inserção dos seres humanos como agentes de mudança nesses ecossistemas deu origem ao conceito de “resiliência de sistemas sócio-ecológicos”, envolvendo pesquisas nas áreas sociais e ampliando o âmbito de aplicação do conceito.

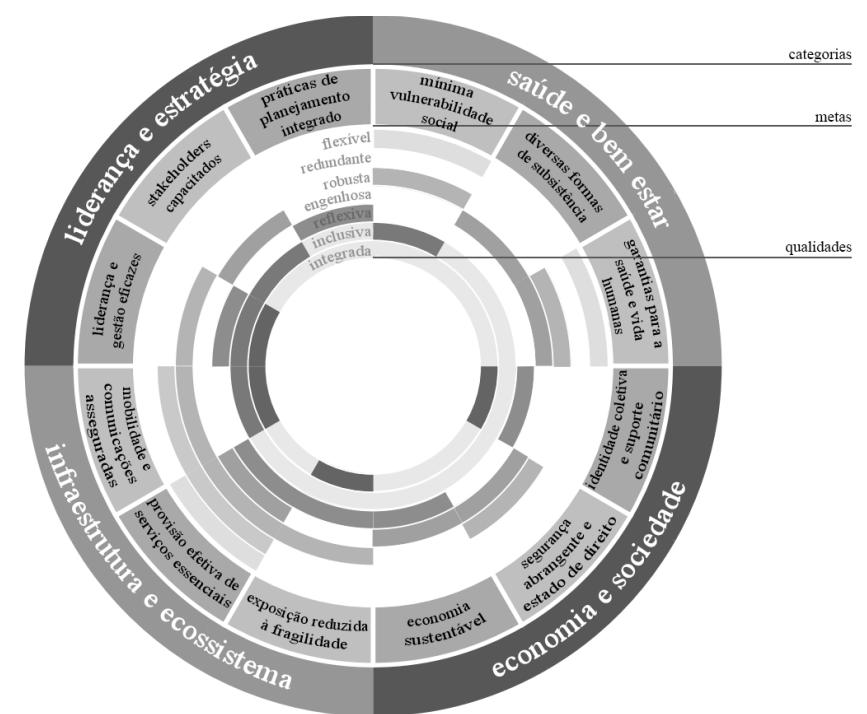
A teoria dos Sistemas Sócio-Ecológicos (SES) conceitua a natureza e a sociedade como um sistema interligado e coevolutivo. Na literatura sobre Sistemas Sócio-Ecológicos, a “resiliência” é identificada como resultante de (1) até que ponto um sistema pode suportar perturbações sem perder suas funções-chave ou alterar seus estados, (2) a capacidade do sistema de auto-organização, e (3) a capacidade do sistema de adaptação e aprendizado (Meerow & Newell, 2019). No entanto, a teoria da resiliência não se limita, de modo algum, à investigação ecológica ou dos SES. Pelo contrário, ela é cada vez mais aplicada em um número crescente de domínios e áreas de interesse, incluindo os estudos urbanos.

O conceito de resiliência aplicado ao desenvolvimento de cidades e territórios surgiu oficialmente em iniciativas políticas no ano de 2005, com a apresentação do documento “*Resilience and Sustainable Development: Building Adaptive Capacity in a World of Transformations*” (Colucci, 2012). O termo “Cidade Resiliente” foi mundialmente reconhecido a partir do livro editado por Vale e Campanella (2005), que tem como título “A Cidade Resiliente” (Papa *et al.*, 2015). Em 2010, a ONU-Habitat lançou a iniciativa “*Making Cities Resilient*” (Construindo Cidades Resilientes), com o objetivo de fortalecer a capacidade das cidades para enfrentar desastres e mudanças climáticas (UNDRR, 2012). Como parte dessa campanha, foram desenvolvidos os “Dez Elementos Essenciais para Tornar as Cidades Resilientes” (*The Ten Essentials for Making Cities Resilient*), que visam acelerar a implementação do Marco de Sendai para Redução do Risco de Desastres (2015-2030) em nível local (ONU, 2015). Paralelamente a UNESCO passou a incorporar o conceito de resiliência urbana em suas diretrizes e programas, promovendo pesquisas, capacitações e políticas públicas voltadas à sustentabilidade e adaptação das cidades frente aos desafios ambientais e sociais do início do século XXI. Essa recebeu grande relevância e atenção especialmente em 2012, em decorrência das mortes causadas pelo ciclone Sandy no nordeste dos Estados Unidos da América (EUA). Nos anos recentes, o termo ganhou popularidade, especialmente devido à sua adoção por organizações internacionais tanto públicas quanto privadas (Papa *et al.*, 2015).

O interesse por cidades mais preparadas para a ocorrência de eventos catastróficos é devido ao crescente número de pessoas vivendo em zonas urbanas, o que aumenta, consequentemente, os riscos das mesmas. Além disso, a probabilidade de eventos naturais inesperados tem crescido devido às mudanças climáticas (Rockefeller Foundation, 2015; Walker & Salt, 2006). De acordo com a Rockefeller Foundation (2015), a resiliência de uma cidade significa sua capacidade de funcionar ativamente, permitindo que todas as pessoas que nela habitam, especialmente as vulneráveis, vivam com qualidade, independente dos estresses que enfrentem (Figura 14). De maneira semelhante, Papa *et al.* (2015) apresentam a definição geral de “cidade resiliente” como uma região capaz de absorver pressões externas de forma a se adaptar ou se transformar



**Figura 13.** Gráficos da analogia topográfica e as visões de espaço de estado da natureza em evolução. O sistema modifica seus próprios estados possíveis à medida que muda ao longo do tempo de 1 para 4. Neste exemplo, à medida que o tempo avança, uma perturbação progressivamente menor é necessária para alterar o estado de equilíbrio do sistema de um domínio para o outro, até que o sistema mude de estado espontaneamente. Fonte: Holling, 1996.



**Figura 14.** Framework da resiliência urbana. Fonte: Rockefeller Foundation, editado e traduzido pela autora, 2015.

em decorrência de tais pressões, garantindo a segurança de comunidades estabelecidas e a preservação de suas funções básicas durante uma crise.

Paralelamente, ao longo do tempo, a pesquisa acadêmica em resiliência urbana expandiu seu escopo para incorporar não apenas os SES, mas também os sistemas “sócio-tecnológicos” (Muñoz-Erickson, 2021; Meerow & Newell, 2016a). A abordagem de pensar a cidade como um sistema sócio-tecnológico-ecológico (SETS) postula que os sistemas urbanos consistem de interações complexas entre sistemas sociais, instituições e conhecimento, além de infraestruturas físicas, tecnologias e o ambiente construído, somados os sistemas ecológicos que interagem com elementos humanos e construídos ou que são projetados neles (Muñoz-Erickson, 2021).

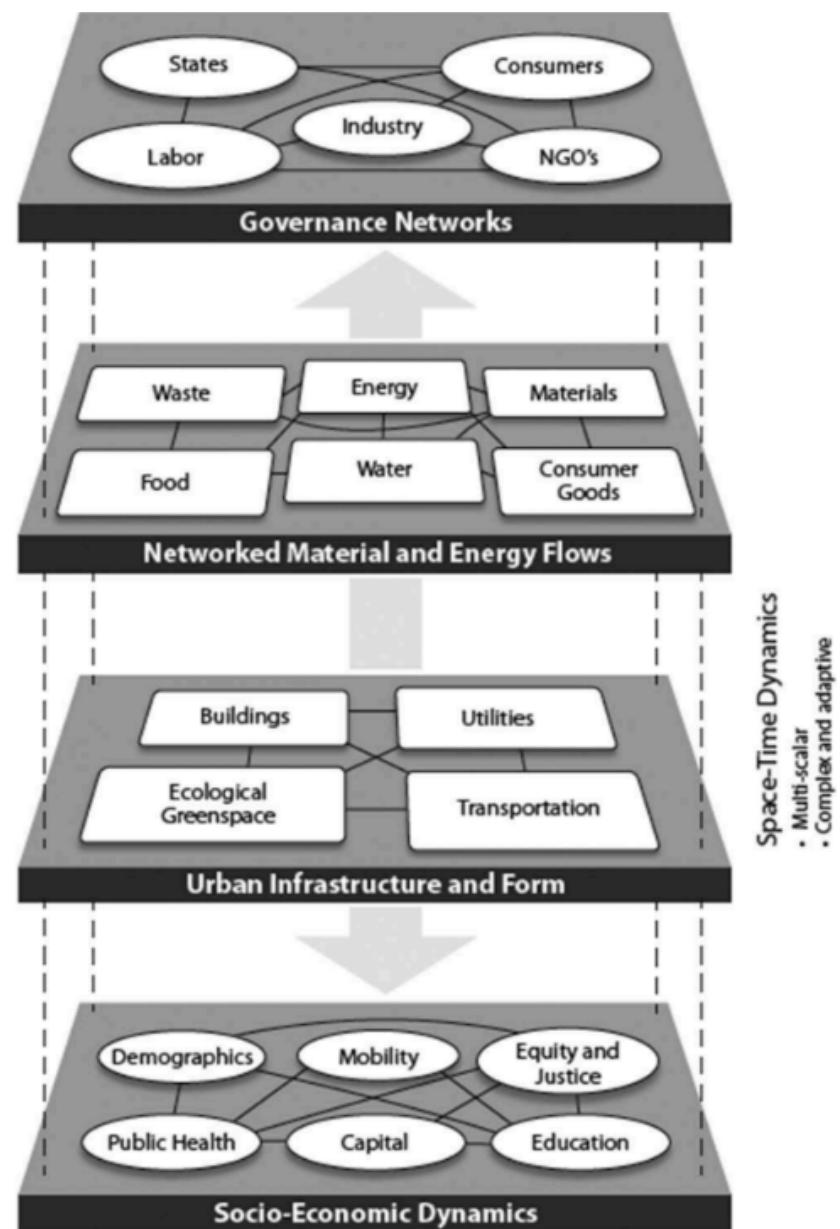
Em estudo de 2022, Herzog menciona o termo “sistemas sócio ecológico tecnológico econômicos” no debate sobre as cidades, enfatizando o componente econômico em iniciativas que buscam destacar a relevância desse aspecto em qualquer abordagem urbana em cidades capitalistas. No entanto, a questão parece mais centrada na nomenclatura do que na necessidade semântica, uma vez que a economia pode ser compreendida como um elemento intrínseco do tecido social da cidade.

Nesse contexto, a resiliência urbana é vista como um entendimento de múltiplos equilíbrios, reconhecendo que as cidades estão em constante evolução e devem ser projetadas para serem “resistentes a falhas” em vez de “à prova de falhas” (Liao, 2012; Pickett *et al.*, 2004). Meerow e Newell chegaram à seguinte definição de resiliência urbana:

A resiliência urbana refere-se à capacidade de um sistema urbano (e de todas as redes sócio-ecológicas e sócio-técnicas que o constituem, através de escalas temporais e espaciais), de forma a manter ou regressar rapidamente às funções desejadas face a uma perturbação, de se adaptar à mudança e de rapidamente transformar os sistemas que limitam a capacidade de adaptação atual ou futura. (Meerow & Newell, 2016a, p. 39, tradução nossa)

Nessa definição, a resiliência urbana é dinâmica, oferecendo várias abordagens para alcançá-la, como persistência, transição e transformação. Ela reconhece a importância do tempo e promove uma adaptação geral, em vez de uma adaptação específica. O sistema urbano é concebido como complexo e flexível, composto por redes sócio-ecológicas e sócio-tecnológicas que abrangem várias escalas espaciais. A resiliência é considerada explicitamente um estado desejável, portanto, sua implementação deve ser negociada entre os envolvidos no processo prático (Meerow & Newell, 2016) (Figura 15).

Além de estabelecer as bases para compreender o entendimento da resiliência ao longo do tempo, também foram identificados termos-chave que estão intrinsecamente ligados. Na tabela 1, é possível observar esses termos, sua escrita original e suas respectivas definições.



**Figura 15.** Esquema conceitual do sistema urbano. Fonte: Meerow & Newell, 2016.

TRADUÇÃO NOSSA	TERMO ORIGINAL	DEFINIÇÃO ADOTADA	REFERÊNCIAS
<b>RESILIÊNCIA</b>	<i>“Resilience”</i>	A capacidade de persistência de um sistema, ou seja, a sua capacidade de absorver alterações nas variáveis de estado e controle e nas mudanças de parâmetros e ainda assim persistir.	Holling, 1973.
<b>RESILIÊNCIA URBANA</b>	<i>“Urban Resilience”</i>	A resiliência urbana refere-se à capacidade de um sistema urbano — e de todas as redes sócio-ecológicas e sócio-técnicas — que o constituem, através de escalas temporais e espaciais — em manter ou regressar rapidamente às funções desejadas face a uma perturbação, bem como de se adaptar à mudança e de rapidamente transformar os sistemas que limitam a capacidade de adaptação atual ou futura.	Meerow & Newell, 2016a.
<b>EXPOSIÇÃO; SENSIBILIDADE</b>	<i>“Exposure”;</i> <i>“Sensitivity”</i>	Suscetibilidade a processos das condições climáticas e da dinâmica de ocupação de um sistema que sejam considerados problemáticos, arriscados ou perigosos de alguma forma para a comunidade de interesse. São termos aliados ao conceito de vulnerabilidade.	Smit & Wandel, 2006; Yu <i>et al.</i> , 2023a.
<b>RISCO</b>	<i>“Risk”</i>	Possibilidade de acontecimento de um evento indesejado.	Yu <i>et al.</i> , 2023a
<b>ADAPTAÇÃO; ADAPTABILIDADE; CAPACIDADE ADAPTATIVA</b>	<i>“Adaptation”;</i> <i>“Adaptability”;</i> <i>“Adaptative Capacity”</i>	A adaptação no contexto das dimensões humanas da mudança global geralmente se refere a um processo, ação ou resultado em um sistema para lidar melhor, gerenciar ou se ajustar a alguma condição, estresse, perigo, risco ou oportunidade em mudança. As adaptações podem ser antecipatórias ou reativas e, dependendo do seu grau de espontaneidade, podem ser autônomas ou planejadas. As adaptações são manifestações da capacidade adaptativa. As adaptações refletem a capacidade adaptativa.	Smit & Wandel, 2006; Folke, 2006.
<b>VULNERABILIDADE</b>	<i>“Vulnerability”</i>	A vulnerabilidade é considerada uma característica ou qualidade inerente de um sistema socioecológico que se depara com uma ameaça em potencial, incluindo componentes como sensibilidade a distúrbios e adaptabilidade. A vulnerabilidade de um sistema (em qualquer escala) reflete (ou é função de) a exposição e a sensibilidade desse sistema a condições perigosas e à capacidade de recuperação dos efeitos dessas condições.	Smit & Wandel, 2006; Yu <i>et al.</i> , 2023a.
<b>ROBUSTEZ</b>	<i>“Robustness”</i>	A capacidade de manutenção de algumas características desejadas do sistema, apesar das flutuações no comportamento de seus componentes ou de seu ambiente.	Folke, 2006.
<b>RECUPERAÇÃO</b>	<i>“Recovery”</i>	A recuperação das funções básicas de um sistema após um distúrbio. Esta recuperação pode se dar de forma a recuperar um equilíbrio anterior ou partir para um novo estado de equilíbrio.	Folke, 2006; Yu <i>et al.</i> , 2023a.
<b>RESISTÊNCIA</b>	<i>“Resistance”</i>	Para Yu <i>et al.</i> (2023a) é a tendência de um sistema, durante um desastre, de minimizar consequências negativas e/ou manter suas funções principais. Para Liao (2012), caracteriza-se uma cidade pouco resiliente aquela que apresenta um pensamento de mono-equilíbrio.	Yu <i>et al.</i> , 2023a; Liao, 2012.
<b>DISTÚRBIO; DESASTRE; CHOQUE</b>	<i>“Disturbance”;</i> <i>“Disaster”;</i> <i>“Shock”</i>	Evento considerado negativo para um sistema, no sentido em que ele possui a capacidade de afetar as funções vitais deste sistema.	Holling, 1973; Folke, 2006.

TRADUÇÃO NOSSA	TERMO ORIGINAL	DEFINIÇÃO ADOTADA	REFERÊNCIAS
<b>FLEXIBILIDADE</b>	“Flexibility”	Característica de um sistema em poder mudar, evoluir e se adaptar em resposta a diferentes mudanças.	The Rockefeller Foundation, 2015.
<b>DIVERSIDADE</b>	“Diversity”	Capacidade de um sistema de possuir diferentes formas de atender a uma mesma necessidade ou de cumprir uma função específica. Característica desejável de um sistema em termos de absorção de distúrbios e de regeneração e reorganização do sistema após o distúrbio.	Folke, 2006; The Rockefeller Foundation, 2015.
<b>TRANSFORMABILIDADE</b>	“Transformability”	A capacidade dos atores de um sistema sócio-ecológico de criar um novo sistema quando as condições existentes (ecológicas, políticas, sociais ou econômicas) são insustentáveis.	Folke, 2006; Gonçalves <i>et al.</i> , 2021.
<b>REGIME</b>	“Regime”	Conjunto de estados possíveis que não comprometem as funções fundamentais de um sistema.	Gonçalves <i>et al.</i> , 2021.
<b>LIMIAR</b>	“Limiar”; “Threshold”	Ponto de ruptura entre regimes diferentes, quando se sai de um regime prévio para o início de um novo.	Gonçalves <i>et al.</i> , 2021; Liao, 2012.
<b>SUSTENTABILIDADE</b>	“Sustainability”	Significa equilibrar as necessidades econômicas, sociais e ambientais em um contexto intergeracional, porque os recursos não são ilimitados e alguns não são renováveis.	Novotny, 2010.
<b>OTIMIZAÇÃO; EFICIÊNCIA</b>	“Optimization”	Leva à eliminação de redundâncias e à manutenção apenas dos elementos que são imediatamente benéficos. Supõem que a mudança será incremental e linear; também tende a ignorar mudanças que ocorrem em escalas mais altas ou mais baixas de organização.	Novotny, 2010.
<b>CONECTIVIDADE</b>	“Connectivity”	A conectividade é o meio pelo qual muitas funções operam simultaneamente em múltiplas escalas; inversamente, a falta de conectividade é frequentemente uma causa principal de mau funcionamento ou falha de funções específicas.	Novotny, 2010.
<b>MULTIFUNCIONALIDADE</b>	“Multifunctionality”	Isso pode ser alcançado através da entrelaçamento/combinando funções. Outra estratégia de <i>design</i> é a integração vertical, na qual múltiplas funções podem ser “empilhadas” em um único local.	Novotny, 2010.
<b>MODULARIDADE</b>	“Modularity”	A modularização é definida como a construção ou uso de unidades padrão que permitem flexibilidade e variedade de uso. A modularização também se refere ao <i>design</i> e operação de subsistemas discretos, em vez de sistemas integrados centralizados.	Novotny, 2010.
<b>REDUNDÂNCIA</b>	“Redundancy”	Capacidade sobressalente dentro dos sistemas de realizar funções para que eles possam acomodar interrupções, pressões extremas ou picos de demanda. Redundância é definida como múltiplos elementos ou componentes fornecendo funções iguais, semelhantes ou de <i>backup</i> .	Novotny, 2010; The Rockefeller Foundation, 2015.

**Tabela 1** Termos-chave da pesquisa em resiliência. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A resiliência pode ser tratada de forma geral ou específica. Geral quando não visa um único risco, mas trata todos como potenciais choques para a cidade no futuro e avalia a resiliência a partir de uma perspectiva holística (Yu *et al.*, 2023a). O estudo da resiliência urbana contra inundações pressupõe um foco na resiliência de forma específica, por se tratar de um fenômeno climático específico. Tal escolha teórica pode levar a um ganho de fragilidade do sistema de outras formas, possibilidade que deve ser considerada (Yu *et al.*, 2023a; Folke, 2006).

No entanto, dada a intrincada natureza da resiliência urbana em todas as suas facetas, o estudo em questão concentra-se em um quadro de resiliência específico. A seguir, serão estabelecidos os parâmetros da resiliência urbana contra inundações para esta pesquisa.

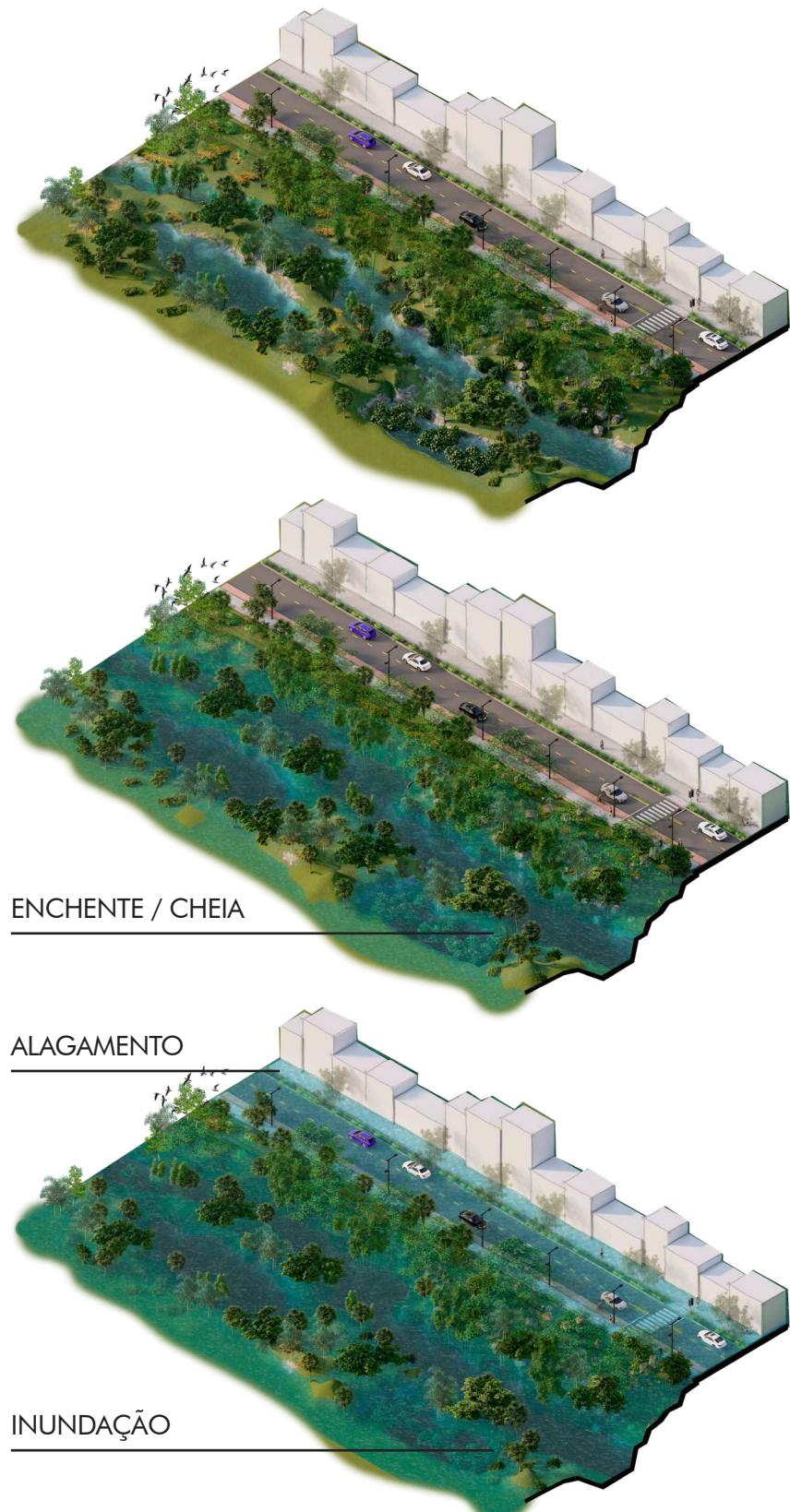
### 3.1.1 RESILIÊNCIA URBANA A INUNDAÇÕES

A urbanização das planícies de inundaçõ<sup>1</sup> reduz sua capacidade de lidar com inundações em comparação com áreas não urbanizadas devido à diminuição da disponibilidade de solo para absorver e reter água da inundaçõ<sup>1</sup> e seus sedimentos (Liao K., 2012; Lamond *et al.*, 2015). A necessidade de proteção contra inundações nas áreas urbanas é parcialmente atribuída ao desenvolvimento de sistemas de abastecimento de água e drenagem, denominados Infraestruturas Cinzas, que podem aumentar os riscos de inundações imprevistas devido aos processos simplificados de armazenamento e transporte de água e esgoto dentro, ao redor e fora das áreas urbanas (Hamilton, 2009). As Infraestruturas Cinzas são criadas artificialmente e projetadas para atender às necessidades de gerenciamento e retenção estáticas (Yin *et al.*, 2023; Novotny, 2010).

Frequentemente, a busca por resiliência está relacionada a riscos incertos e específicos do local e do clima, vinculados a eventos naturais como fortes chuvas, afluxo de rios e ameaças costeiras. Portanto, o setor de gestão de recursos hídricos desempenha um papel crucial na promoção e ameaça à resiliência urbana, seja devido a falhas e escassez de recursos hídricos ou a riscos concretos, como inundações e doenças transmitidas pela água (Hamilton, 2009). Adicionalmente, a falta de experiência da população em lidar com situações excepcionais de cheias, especialmente quando estão acostumadas a viver em condições de seca e estabilidade, pode resultar na incapacidade de reagir de maneira eficaz a eventos de inundaçõ<sup>1</sup>, potencialmente levando ao colapso das operações urbanas (Liao K., 2012).

<sup>1</sup> “Inundaçõ<sup>1</sup>”, “enchente” e “alagamento” são termos que, por vezes, podem ser usados como sinônimos; no entanto, possuem significados distintos (Figura 16):

- **Planície de Inundaçõ<sup>1</sup> ou Várzea:** “Áreas marginais que recebem episodicamente os excessos de água que extravasam do canal de drenagem.” (IPT, 2007, p. 93).
- **Inundaçõ<sup>1</sup>:** “Processo de extravasamento das águas do canal de drenagem para as áreas marginais (planície de inundaçõ<sup>1</sup>, várzea ou leito maior do rio) quando a enchente atinge cota acima do nível máximo da calha principal do rio.” (IPT, 2007, p.91).
- **Enchente ou Cheia:** “Elevação temporária do nível d’água em um canal de drenagem devida ao aumento da vazão ou descarga.” (IPT, 2007, p.90).
- **Alagamento:** “Acúmulo momentâneo de águas em uma dada área decorrente de deficiência do sistema de drenagem.” (IPT, 2007, p.94).



**Figura 16.** Ilustrações sequenciais das condições hídricas do território, evidenciando as fases de enchente, alagamento e inundaçõ<sup>1</sup>. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A abordagem resiliente no gerenciamento de risco de inundações trata esses eventos de uma forma diferente da abordagem tradicional das Infraestruturas Cinzas, pois se baseia na ideia de multiequilíbrio mencionada anteriormente. Desse modo, a abordagem inicia com o reconhecimento de enchentes periódicas como uma dinâmica ambiental inerente, pela qual o funcionamento dos sistemas urbanos é naturalmente afetado (Veról *et al.*, 2022; Liao K., 2012). Em se tratando do conceito de multiequilíbrio, prega-se que, a cada evento, o território atingido seja capaz de reajustar suas estruturas e processos internos e construir conhecimentos; logo, estará mais preparado ao longo do tempo (Liao K., 2012).

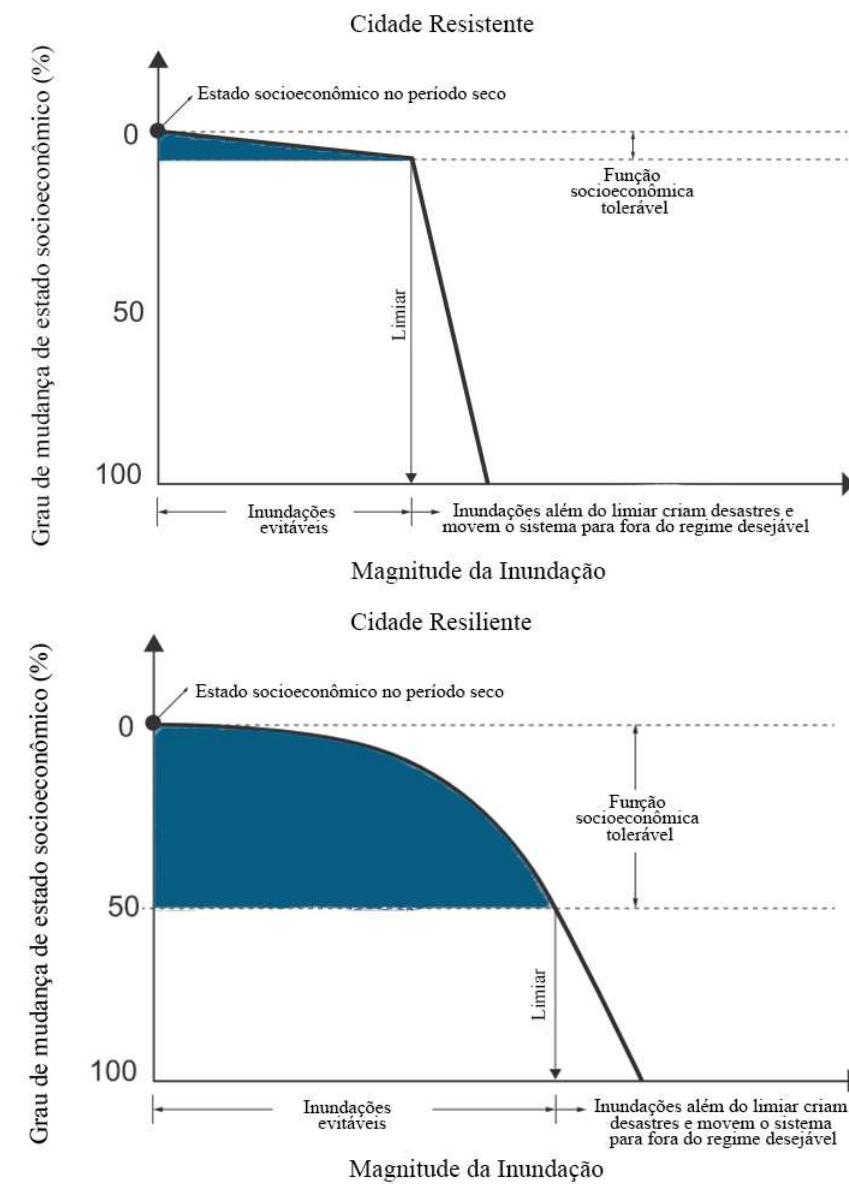
A construção da resiliência urbana contra inundações é, fundamentalmente, um processo de adaptação. Em vez de lutar contra as forças naturais dos sistemas hidrológicos, as cidades reconhecem a ocorrência periódica das inundações e aprendem com elas, permitindo que aconteçam de forma controlada (Figura 17). Essa abordagem visa tornar as cidades mais resilientes às inundações extremas. Além disso, essa filosofia de adaptação também se reflete no planejamento urbano, pois, à medida que as cidades se afastam de estruturas rígidas, em busca de suposta estabilidade ambiental, passam a adotar estruturas mais flexíveis e adaptáveis (Liao K., 2012).

Seguindo a conceituação de Liao K. (2012), Gonzalez *et al.* (2020) propõe três propriedades-chave da resiliência urbana frente inundações fluviais: i) redundância de subsistemas; ii) tempo de aprendizagem após cada evento; e iii) capacidade de resposta localizada. Cada um deles, enfatizando o fator “tempo de adaptação” como elemento determinante, são denominados “caminhos para a resiliência”. Especificamente, a redundância dos subsistemas, ou seja, a diversidade e a flexibilidade dos mesmos respondem pela capacidade de resposta funcional rápida e eficaz às perturbações que afetam o sistema para que este não entre em colapso (Gonzalez *et al.*, 2020).

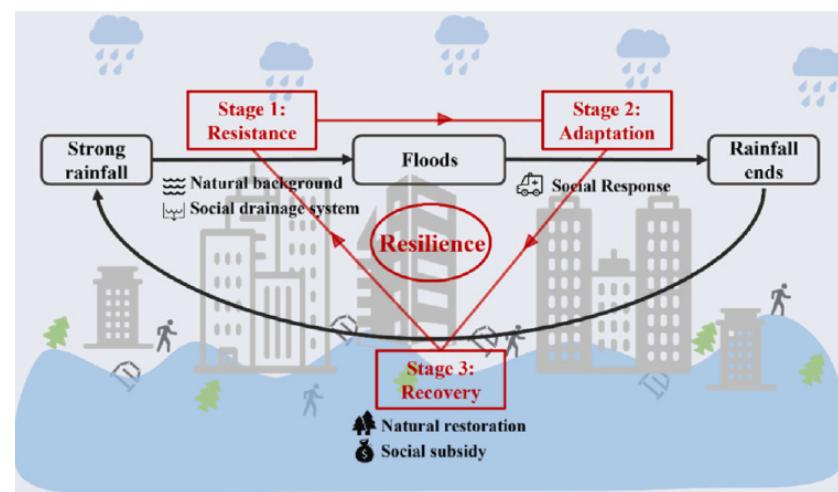
Já Yu *et al.* (2023a) enfoca a resiliência a inundações como um processo cílico com três etapas principais: resistência, robustez e recuperação, as quais correspondem aos três momentos das inundações: antes, durante e depois. Quando as chuvas começam, tanto o sistema social quanto o ecológico são afetados por distúrbios. Quando atingem um ponto crítico, as inundações ocorrem. Durante esse período, a capacidade da cidade de manter sua estabilidade a longo prazo diante de choques desempenha um papel crucial na prevenção de desastres. Se a cidade demonstra alta robustez, a probabilidade de inundações significativas é reduzida.

Durante a inundação, a capacidade de resistir a desastres (resistência) é influenciada por diversos fatores, incluindo características naturais, infraestrutura urbana, velocidade de resposta e operações de resgate. Uma maior resistência reduz o impacto negativo das inundações, tornando o sistema mais resiliente. Conforme o distúrbio da precipitação diminui e as inundações recuam, a cidade gradualmente se recupera das consequências adversas e retorna a um estado estável até o próximo distúrbio (Figura 18) (Yu *et al.*, 2023a; Yu *et al.*, 2023b).

Entretanto, observa-se que a introdução do termo “resistência” emerge tal qual um fator que potencialmente pode diminuir a resiliência do sistema como um todo, uma vez que se aproxima da concepção de



**Figura 17.** Gráficos ilustrativos exemplificando a diferença entre a cidade resistente e a cidade resiliente a inundações. Fonte: Liao K., 2012. Traduzida e editada pela autora, 2020.



**Figura 18.** Ilustração das diferentes etapas da resiliência às inundações urbanas. Fonte: Yu et al., 2023b.

um equilíbrio estável. Nesse contexto, o que é proposto por Yu *et al.* (2023a) distancia-se da ideia de múltiplos equilíbrios proposta por Liao (2012), na qual a autora sugere que as comunidades devem aceitar e incorporar a noção de ocorrência constante de enchentes, com a faixa de “resistência” encurtada ao máximo possível. Além disso, o termo “recuperação” também pode implicar em uma redução na resiliência, pois sugere um retorno ao estado de equilíbrio anterior, aproximando-se mais do conceito de resiliência de engenharia. Isso enfatiza a importância de uma definição precisa do termo “resiliência” em qualquer contexto de aplicação, devido às múltiplas interpretações e aplicações existentes.

Diante desse cenário, como abordar a resiliência às inundações de forma a naturalizar o evento “extremo”, mantendo a aplicabilidade das infraestruturas que atuam para sua atenuação? É aqui que o conceito de “ciclo adaptativo” de Gunderson & Holling (2002) torna-se relevante. Ele oferece uma abordagem que se assemelha à perspectiva de Liao (2012), destacando a perturbação como um elemento essencial no desenvolvimento dos sistemas ecológico-sociais. Ambos ressaltam a coexistência e complementaridade de períodos de transição rápida e mudança gradual representados por um símbolo do infinito tridimensional, estendendo-se indefinidamente em múltiplas escalas. Retomar esse conceito pode enriquecer as ideias previamente discutidas sobre a resiliência às inundações, proporcionando profundidade e complexidade ao entendimento desse fenômeno.

A partir deste pensamento, comprehende-se que a resiliência às inundações em áreas urbanas reside na capacidade deste sistema de:

- Diminuir o tempo de duração da fase de liberação e/ou mitigar seus impactos adversos no funcionamento diário das cidades, minimizando ao máximo os efeitos nos sistemas e, especialmente, na vida da população<sup>2</sup>;
- Estabelecer metodologias institucionalizadas para monitorar as infraestruturas de drenagem urbana, visando uma rápida e eficaz capacidade de aprendizado e adaptação após a ocorrência de eventos críticos, não apenas para reação imediata, mas também para uma adaptação contínua e efetiva;
- Antecipar períodos de estabilidade e robustez mais breves, utilizando infraestruturas de detecção de inundações não convencionais, a fim de suavizar os impactos repentinos e promover momentos mais frequentes de reestruturação e aprendizado.

Essa abordagem multifacetada, baseada na compreensão dinâmica das inundações e na flexibilidade das estratégias de adaptação, é fundamental para promover resiliência urbana efetiva e sustentável em face dos desafios das inundações.

Agora que estabelecemos uma definição clara dos objetivos no uso de SBNs, avançaremos para compreender o que são as SBNs e como serão abordadas conceitualmente neste trabalho.

2 Os alagamentos urbanos geram efeitos adversos que vão desde impactos diretos, como perdas humanas e destruição de infraestruturas, até consequências indiretas, como o aumento da incidência de doenças de veiculação hídrica e problemas de saúde mental decorrentes da vulnerabilidade social e econômica. Diante desses riscos, a resiliência urbana deve ser planejada de forma estratégica, priorizando a minimização dos danos em ordem de importância, com foco inicial na preservação da vida, seguida pela proteção da saúde pública e da infraestrutura essencial, garantindo assim a recuperação mais eficiente das áreas afetadas.



**Figura 19.** Imagens de cheia e seca do Yanweizhou Wetland Park, China. O parque foi planejado para funcionar durante períodos de inundaçāo. Fonte: <<https://www.amusingplanet.com/2015/12/yanweizhou-wetland-park-china.html>>. Acesso em: 8 maio. 2024.

## Tópico 3.2

### A NATUREZA COMO INFRAESTRUTURA E SEUS MUITOS TERMOS

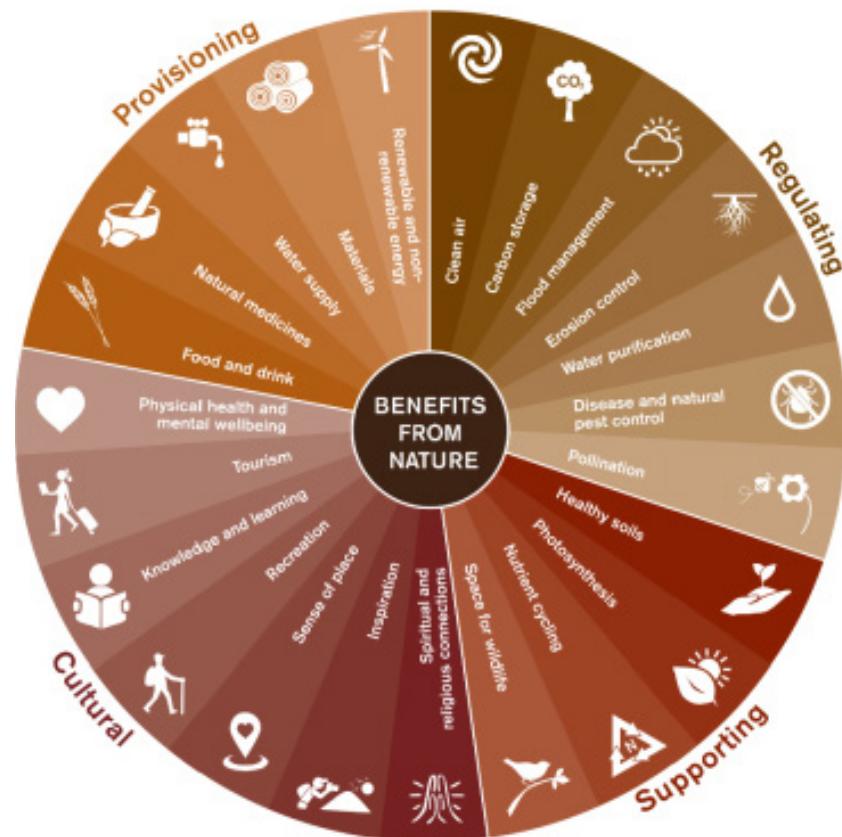
Na década de 1980, Santos (1988) explorou a distinção entre os conceitos de natureza e infraestrutura. A questão central residia na viabilidade de discernir entre a infraestrutura e o ambiente ecológico, uma vez que, devido à atividade humana, esses elementos estão intrinsecamente interligados, tornando-se indissociáveis (Santos, 1988). O autor sublinhou que, à luz da compreensão de que qualquer ambiente influenciado pela intervenção humana deixa de ser considerado um ambiente natural e passa a ser categorizado como um ambiente não natural, ou seja, artificial, a distinção entre essas duas categorias perde a sua relevância. Isso ocorre porque, mesmo quando um ambiente natural aparenta não ter sofrido interferência direta da atividade humana, ele ainda é sujeito ao controle e à especulação por parte das sociedades:

A natureza primeira, como sinônimo de “natureza natural”, só existiu até o momento imediatamente anterior àquele em que o homem se transformou em homem social, através da produção social. A partir desse momento, tudo o que consideramos como natureza primeira já foi transformado. Esse processo de transformação, contínuo e progressivo, constitui uma mudança qualitativa fundamental nos dias atuais. (Santos, 1988, p. 8)

Até aqui entende-se que a natureza enquanto organismo cósmico irretocável não existe (Simon, 1996), assim, o entendimento da natureza enquanto infraestrutura permeia por outras questões.

Enquanto termo, a infraestrutura geralmente é interpretada como uma base subjacente, um sistema estrutural que sustenta funções sociais e serviços sociais ou físicos específicos (Novotny, 2010). Portanto, para que a natureza seja classificada como infraestrutura, é necessário considerá-la de maneira sistêmica, além de reconhecer sua capacidade de fornecer serviços sociais e físicos. A fim de abordar essa perspectiva, o conceito de “serviços ecossistêmicos” foi desenvolvido, englobando os benefícios que os ecossistemas naturais proporcionam às comunidades (Bush & Doyon, 2019; Rouse, 2013; Reinhard, 2022). Assim, emerge a conceituação da natureza como infraestrutura para o ser humano, e essa base conceitual fundamenta o termo “soluções baseadas na natureza” — um termo guarda-chuva a abordagens baseadas em ecossistemas para enfrentar os desafios sociais das mudanças climáticas, desastres naturais, segurança alimentar e hídrica, saúde e bem-estar humanos e desenvolvimento econômico e social (Bush & Doyon, 2019).

A definição do conceito “serviços ecossistêmicos” teve início em debates científicos durante a década de 1990. No entanto, o termo “Soluções Baseadas na Natureza” (SBN) só foi introduzido de forma



**Figura 20.** Ilustração com os diferentes serviços oferecidos pela natureza. Fonte: <<https://www.nature.scot/scotlands-biodiversity/scottish-biodiversity-strategy-and-cop15/ecosystem-approach/ecosystem-services-natures-benefits>>. Acesso em: 8 maio. 2024.

pioneira em 2008 pelo Banco Mundial (Sowińska-Świerkosz & García, 2021; Herzog *et al.*, 2022). A concepção do conceito surgiu da necessidade de encontrar abordagens inovadoras para a gestão de sistemas naturais, buscando um equilíbrio entre os benefícios proporcionados à natureza e à sociedade.

É importante ressaltar que, antes da ampla adoção do termo SBN, outras visões que exploram a perspectiva da natureza como uma infraestrutura já estavam sendo discutidas e implementadas, as mesmas podendo ou não ser consideradas como parte das SBN. Tais conceituações indicam metodologias de aplicação de infraestruturas (e infraestruturas em si) e se concentram principalmente na emulação de processos naturais para mitigar os desafios decorrentes das mudanças climáticas e os problemas intrínsecos de áreas urbanas. Suas definições e nomenclaturas podem ser vistas na Tabela 2. Tais termos, quando aplicados como parte de uma estratégia sistêmica, podem ocasionalmente se sobrepor em contextos específicos, uma vez que compartilham premissas e abordagens semelhantes.

A crescente adoção dessas estratégias, tanto por entidades públicas e instituições quanto por grupos de pesquisa em diversos países, reflete a necessidade atual de reavaliar as abordagens utilizadas na intervenção em territórios urbanos. Essa reavaliação não se limita apenas à criação de novos espaços, mas também à adaptação e preservação dos espaços já existentes, com vistas a um futuro no qual a humanidade minimize seu impacto nos ecossistemas e não apenas os preserve, mas também tire proveito de seus serviços.

Para entender se as metodologias mencionadas na Tabela 2 podem se enquadrar enquanto SBN, a definição conceituada por Marques *et al.* (2021 p. 23) é cabível: “Para uma solução ser considerada SBN é necessária a promoção de múltiplos benefícios à sociedade e aumento de biodiversidade.” Ou seja, todas as estratégias antes mencionadas podem ser consideradas SBN se fornecerem serviços ecossistêmicos à sociedade e, concomitantemente, promoverem a conservação da biodiversidade. O infográfico na Figura 22 representa as possibilidades de interseccionalidade entre as diferentes estratégias.

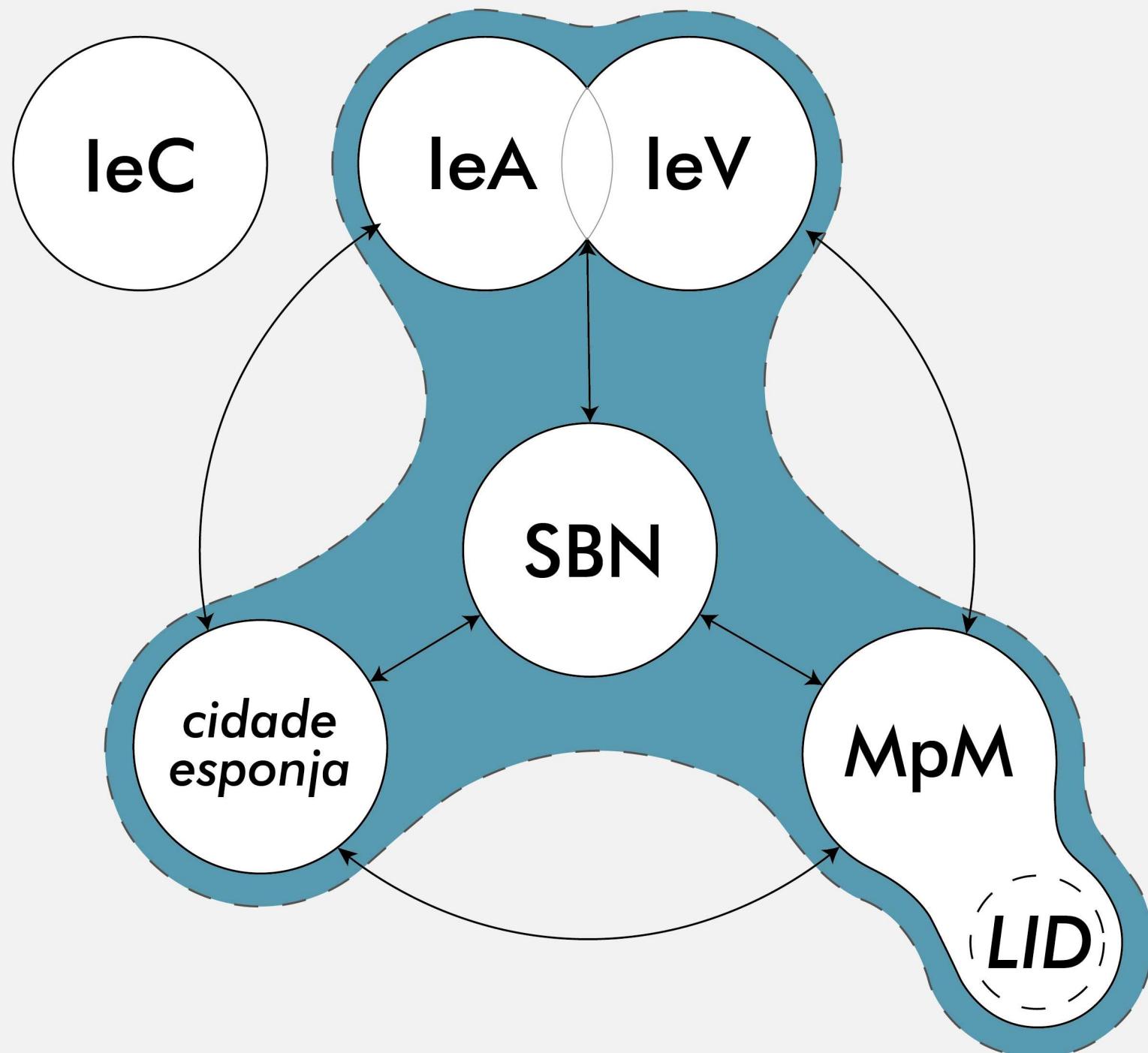
Essas metodologias incorporam uma variedade de ferramentas que são sistematicamente implementadas em um determinado território de atuação (Figura 23). Essas ferramentas podem ser utilizadas de maneira independente ou como parte de diferentes metodologias. Por exemplo, considere um jardim de chuva — uma estrutura concebida para a retenção e dispersão de águas pluviais por meio de um espaço ajardinado em ambiente urbano. O jardim de chuva pode ser categorizado como uma forma de Infraestrutura Verde, uma vez que incorpora um elemento natural ao cenário da cidade. Por sua vez, ele também pode ser enquadrado como uma Infraestrutura Azul, pois integra o sistema de drenagem da região em que está situado. Além disso, ele ainda pode ser considerado uma Solução Baseada na Natureza, por emular a natureza e trazer benefícios à biodiversidade e à sociedade.



**Figura 21.** Ilustração dos benefícios das SBN. Fonte: <<https://www.wribrasil.org.br/noticias/solucoes-baseadas-na-natureza-para-adaptacao-em-cidades-o-que-sao-e-por-que-implementa-las>>. Acesso em: 11 novembro. 2024.

TRADUÇÃO NOSSA	TERMO ORIGINAL	DEFINIÇÃO ADOTADA	SURGIMENTO	REFERÊNCIAS
<b>MELHORES PRÁTICAS DE MANEJO (MpM)</b>	<i>Best Management Practices</i>	Originalmente, tinha como filosofia coletar, transportar e tratar o escoamento urbano. Posteriormente, no início do séc. XXI, foi considerada uma ênfase maior na conservação e no uso de recursos naturais.	São mencionadas oficialmente pela primeira vez em 1987, em Lei estadunidense para o controle de poluição das águas ( <i>Clean Water Act</i> ).	Novotny, 2010; Moura, 2014.
<b>DESENVOLVIMENTO DE BAIXO IMPACTO(LID)</b>	<i>Low Impact Development</i>	Concentra-se em intervenções locais de pequena escala que envolvem a contenção, armazenamento, infiltração e transporte das águas pluviais (Novotny, 2010). As técnicas adotadas procuram diminuir as inundações urbanas. É um componente das Melhores Práticas de Manejo. Em outros países estas intervenções recebem nomenclaturas distintas: <i>Sustainable Urban Drainage Systems</i> (SUDS) no Reino Unido, <i>Water Sensitive Urban Design</i> (WSUD) na Austrália e <i>Low Impact Urban Design and Development</i> (LIUDD) na Nova Zelândia.	Teve início no Condado de Prince George, Maryland, nos Estados Unidos, em 1990, o LID começou como uma alternativa às práticas tradicionais de melhor gerenciamento de águas pluviais.	Novotny, 2010; Pellegrino & Alencar, 2022.
<b>INFRAESTRUTURA VERDE (IeV)</b>	<i>Green Infrastructure</i>	Usada como substantivo, a Infraestrutura Verde refere-se a uma rede interconectada de espaços verdes que é planejada e gerenciada por seus valores de recursos naturais e pelos benefícios associados que confere às populações humanas. Usada como adjetivo, a Infraestrutura Verde descreve um processo que promove uma abordagem sistemática e estratégica para a conservação de territórios nas escalas nacional, estadual, regional e local, incentivando o planejamento e as práticas de uso da terra que sejam boas para a natureza e para as pessoas.	O primeiro uso registrado do termo foi visto em um relatório de 1994 da Florida Greenways Commission sobre o Projeto Florida Greenways, um projeto de Infraestrutura Verde realizado em 1991.	Benedict & McMahon, 2006; Herzog & Rosa, 2010; Cormier & Pelegriño, 2008; Rouse, 2013.
<b>INFRAESTRUTURA AZUL (IeA)</b>	<i>Blue Infrastructure</i>	A Infraestrutura Azul tem suas raízes na pesquisa e aplicação do conceito de “Infraestrutura Verde”, emergindo como resposta à necessidade de pesquisadores incorporarem a importância dos “serviços ecossistêmicos azuis” na paisagem. Geralmente encontrada na literatura, a Infraestrutura Azul compreende extensas áreas localizadas no final do sistema de drenagem, como rios, lagoas de armazenamento e canais de drenagem, projetadas para conter o excesso de águas pluviais. Além disso, essa abordagem pode incluir soluções menores a jusante do sistema de drenagem.	A Infraestrutura Azul tornou-se um conceito proeminente para a gestão de água urbana no século 21, com muitas práticas evoluindo nos anos 2000 a partir da Infraestrutura Verde.	Haase, 2015; Yin <i>et al.</i> , 2023.
<b>CIDADE ESPONJA</b>	<i>Sponge City</i>	Em uma Cidade Esponja, o planejamento urbano se concentra na criação de paisagens e infraestruturas que possam absorver, armazenar e purificar a água da chuva. Isso reduz o risco de inundações, melhora a qualidade da água e promove a sustentabilidade. As Cidades Esponjas são a personificação da gestão abrangente da água urbana.	O conceito foi concebido em 2014 em resposta a uma incidência crescente de inundações urbanas ou alagamentos nas cidades chinesas.	Griffiths <i>et al.</i> , 2020; Welling & Dalton, 2022.

**Tabela 2** Termos e definições para infraestruturas que fornecem serviços ecossistêmicos. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.



↔ Podem se cruzar no mesmo caso.

- - - - - Está dentro de outro termo.

**Figura 22.** Infográfico das diferentes terminologias da natureza enquanto infraestrutura. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

No entanto, é importante notar que, quando considerado como uma entidade isolada, o jardim de chuva não contribui substancialmente para o desenvolvimento de uma rede mais abrangente de Infraestruturas Verdes que visa tornar o território mais resiliente. Além disso, seu impacto é local, não abrangendo a escala necessária para produzir mudanças significativas no território como um todo.

Nem sempre as ferramentas são aplicáveis a todas as metodologias. Tome, por exemplo, o pavimento permeável, uma ferramenta referenciada na literatura sobre Infraestrutura Verde (Herzog & Rosa, 2010; Novotny *et al.*, 2010; Welling & Dalton, 2022; Yin *et al.*, 2023). Todavia, o pavimento permeável não se enquadra na categoria de SBN devido a sua limitada contribuição para a biodiversidade do ambiente urbano. Esta situação exemplifica uma das limitações das SBN, uma vez que, ao estabelecerem requisitos específicos, elas podem restringir outras possibilidades de desenvolver territórios mais resilientes, o que vai de encontro à definição de “termo guarda-chuva” (Bush & Doyon, 2019).

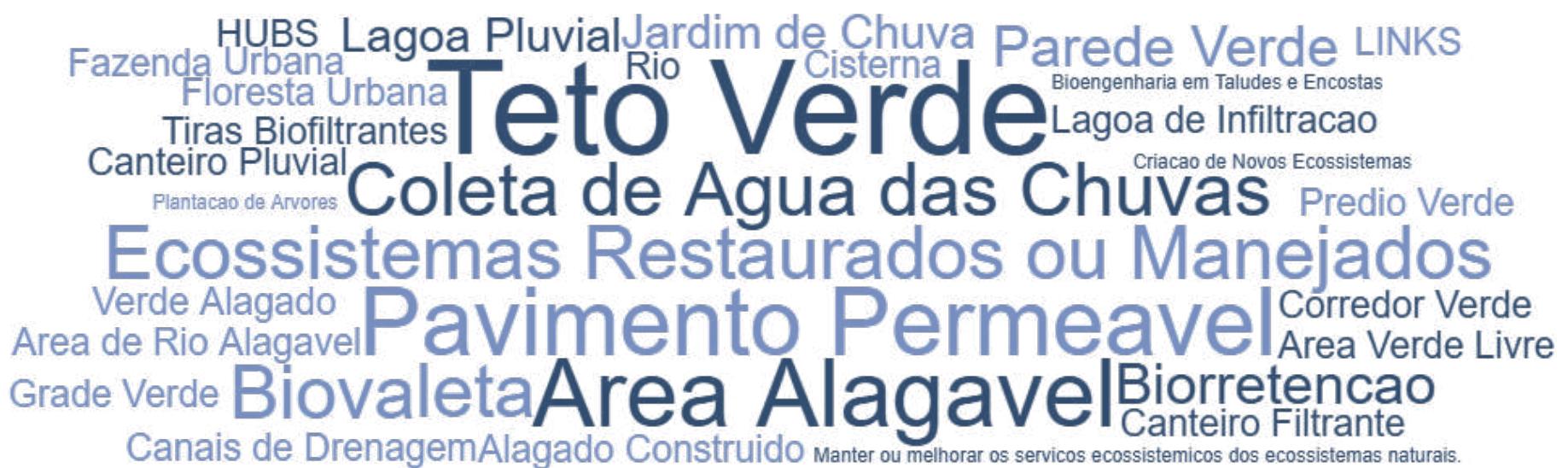
### 3.2.1 A NATUREZA COMO INFRAESTRUTURA DE DRENAGEM

Quais das metodologias apresentadas no tópico anterior se adequam melhor à natureza enquanto infraestrutura de drenagem urbana? Além disso, por que é necessário empregar essas nomenclaturas?

A utilização desses termos se justifica, em parte, pela necessidade de distinguir as abordagens da infraestrutura de drenagem tradicional. A natureza, quando utilizada como elemento de infraestrutura, requer uma designação específica que a diferencie. Afinal, a ausência de uma diferenciação implica que a infraestrutura tradicional e a infraestrutura natural estão em igualdade enquanto serviços prestados à sociedade.



**Figura 23.** Imagens do jardim de chuva do bairro Jabaquara na cidade de São Paulo. Fonte: <<https://editorajuma.com.br/cades-jabaquara-desenvolve-projeto-de-jardim-de-chuva-para-o-bairro/#:~:text=O%20Jardim%20de%20chuva%20foi,frequentada%20por%20usu%C3%A1rios%20de%20drogas.>>. Acesso em: 11 novembro. 2024.



**Figura 24.** Nuvem de palavras das ferramentas da natureza como infraestrutura. Foram selecionados, para cada referência estudada sobre o tema, os termos utilizados para descrever diferentes ferramentas. Em seguida, esses termos foram agrupados em uma planilha do Excel e a nuvem de palavras foi gerada no programa ‘Word Cloud’. As palavras em maior tamanho indicam que foram mencionadas com maior frequência nos textos analisados. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

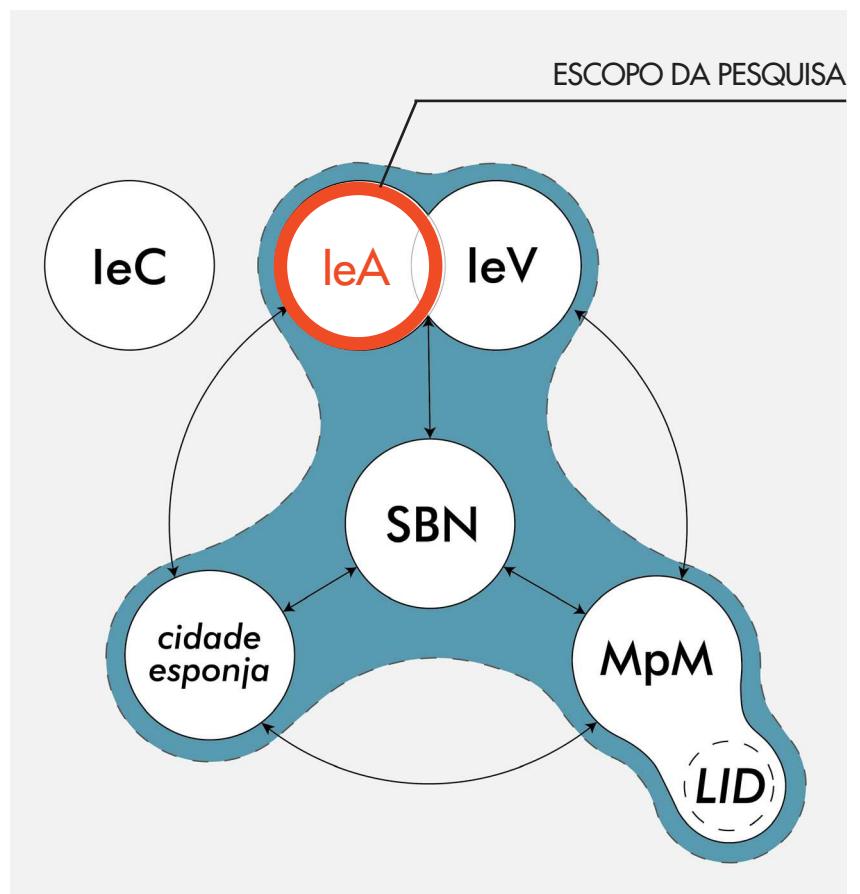
A necessidade de diferenciação surge da compreensão de que os benefícios associados a uma infraestrutura baseada na natureza vão além dos serviços sociais oferecidos pela Infraestrutura Cinza tradicional. O diferencial está na promoção da biodiversidade e nos benefícios intrínsecos que essa biodiversidade proporciona. O aumento da biodiversidade possibilita que o ambiente urbano não cause um impacto tão significativo nos ecossistemas naturais que cercam a área urbana, o que, por sua vez, permite à população lidar de forma mais resiliente com as variações cíclicas e, em certa medida, imprevisíveis dos recursos hídricos.

Por conseguinte, as infraestruturas tratadas neste trabalho serão consideradas SBN desde que atendam aos critérios mencionados anteriormente. A utilização do termo SBN é pertinente para tratar dos benefícios das ferramentas que estão para além das Infraestruturas Cinzas. No entanto, o termo é muito abrangente para trabalhar questões específicas de drenagem. Como alternativa, também será adotado o termo “Infraestrutura Azul”. Tal nomenclatura é relevante, pois mantém a referência às ferramentas abordadas como “infraestruturas” e é frequentemente relacionada na literatura aos termos “Infraestrutura Verde” e “Infraestrutura Cinza”.

Os termos “Infraestruturas Verdes, Azuis e Cinzas” e “Infraestruturas Verdes e Azuis” são comumente utilizados para abordar implantações ou abordagens teóricas que consideram a integração desses tipos de infraestrutura em conjunto. Contudo, como o foco se concentra no estudo do comportamento das águas urbanas, será mantido apenas o termo IeA, mesmo que em alguns momentos os exemplos tratados possam ser considerados Infraestruturas Verdes e Azuis.

As IeAs são infraestruturas que fornecem os chamados “Serviços Ecossistêmicos Azuis”, os quais dizem respeito aos serviços que incluem espaços públicos de lazer e recreação, espaços para educação ambiental, espaços para atividades físicas, novos empregos e empresas que giram em torno da limpeza, coleta e proteção da água, mitigação de inundações e alagamentos, resfriamento do ar, entre outros (Haase, 2015). A Tabela 3, ilustrada pela Figura 22, traz as diferentes soluções de Infraestruturas Azuis que serão consideradas no presente trabalho.

Quando dentro do guarda-chuva das SBN, as Infraestruturas Azuis não incluem equipamentos artificiais que não trazem benefícios aos ecossistemas naturais, como, por exemplo: piscinões, encanamento subterrâneo de drenagem, canais artificiais, reservatórios subterrâneos artificiais, entre outros. Isso não significa que um projeto urbano de drenagem não deva trazer essas alternativas mais “tradicionalis”, contudo, elas não serão o foco desta dissertação. Esse estudo concentra-se em intervenções que trabalham em sistemas urbanos já estabelecidos, com infraestruturas tradicionais pré-existentes. Não implicando necessariamente na remoção ou modificação da infraestrutura tradicional, mas trabalhando na aplicação de IeAs de forma concomitante para o aumento da resiliência no território de estudo.



**Figura 25.** Infográfico das diferentes terminologias da natureza enquanto infraestrutura com o indicativo do escopo da pesquisa. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

TERMO EM PORTUGUÊS	TERMO ORIGINAL	DEFINIÇÃO ADOTADA	REFERÊNCIAS
<b>JARDIM DE CHUVA</b>	<i>Rain Garden / Bioretention Cell</i>	Depressão no solo, natural ou artificial, projetada para coletar e infiltrar a água da chuva que escoa de superfícies impermeáveis, como telhados e pavimentos. Essas áreas são vegetadas com plantas, incluindo árvores, arbustos e gramíneas, que ajudam a absorver a água, aumentar a evapotranspiração e remover poluentes. O solo geralmente é tratado para aumentar sua porosidade, permitindo que funcione como uma esponja que absorve o escoamento superficial. Além disso, microrganismos presentes no solo ajudam a filtrar contaminantes difusos.	Novotny, 2010; Moura, 2014; Cormier & Pelegrino, 2008.
<b>BIOVALETA</b>	<i>Grass Swales / Bioswale</i>	Canais lineares e vegetados que coletam e direcionam o escoamento pluvial, ao mesmo tempo em que promovem a filtragem de poluentes através do solo e da vegetação. Além de desacelerar o fluxo da água e prolongar o tempo de concentração, essas estruturas ajudam a reduzir o volume e os picos de escoamento, permitindo maior infiltração no solo. Assim, atuam na remoção de poluentes (fitoremediação), melhoram a qualidade da água e promovem a retenção de água da chuva.	Novotny, 2010; Pellegrino & Alencar, 2022.
<b>RENATURALIZAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS</b>	<i>River and Stream Renaturalization</i>	Visa restaurar suas características naturais de rios e córregos, revertendo a prática de canalização e construção de barreiras que transformaram esses cursos d'água em canais artificiais para atender ao desenvolvimento urbano. Esse processo envolve técnicas como <i>daylighting</i> (reexposição de trechos cobertos), reestabelecimento de corredores ripários, remoção de estruturas de concreto e revegetação das margens e leito dos cursos d'água. A renaturalização não apenas melhora a gestão de enchentes, permitindo a retenção e infiltração da água e reduzindo picos de escoamento, como também regula a temperatura em áreas próximas ao fornecer sombreamento e moderar o microclima, especialmente em locais densamente urbanizados.	Benedict & McMahon, 2006; Herzog & Rosa, 2010; Cormier & Pelegrino, 2008; Rouse, 2013.
<b>ÁREAS ALAGÁVEIS</b>	<i>Wetlands / River Flood Lands</i>	Ecossistemas biodiversos que combinam solo e água e oferecem serviços ecossistêmicos. Essas áreas funcionam como filtro de poluentes, sedimentos e nutrientes do escoamento superficial, atuando no controle de enchentes e na melhoria da qualidade da água. Podem ser naturais ou construídas, com as naturais sujeitas a padrões de qualidade da água e as construídas usadas para tratamento de águas pluviais ou residuais. Além de protegerem contra inundações e armazenarem carbono, as áreas alagáveis suportam uma grande diversidade de flora e fauna, fornecendo habitats para espécies ameaçadas e oportunidades de recreação e turismo.	Novotny, 2010; Rouse, 2013; Haase, 2015; World Bank, 2021; Welling & Dalton, 2022.
<b>LAGOA PLUVIAL / LAGOA DE RETENÇÃO / LAGOA DE DETENÇÃO</b>	<i>Retention Basin</i>	Lagoas pluviais são estruturas de retenção de água de chuva projetadas para capturar e armazenar temporariamente o escoamento superficial. Elas ajudam no controle de enchentes e na qualidade da água ao reter e filtrar poluentes antes de liberar o excesso no sistema de drenagem. Existem dois tipos principais: lagoas de detenção, que se enchem de água durante períodos chuvosos, permanecendo secas na maior parte do tempo, e lagoas de retenção, que mantêm um corpo d'água permanente, contribuindo para o armazenamento e reutilização da água em períodos de seca. Além de controlar o volume e a qualidade do escoamento urbano, essas lagoas oferecem habitats para espécies e melhoram o microclima ao promover o resfriamento do ar.	Haase, 2015; Yin <i>et al.</i> , 2023.
<b>JARDIM FILTRANTE</b>	<i>Biofilter</i>	Os jardins filtrantes são sistemas que utilizam a vegetação para ajudar na remoção de poluentes do escoamento da água da chuva. Isso inclui jardins de chuva, vegetações biofiltrantes em lagoas pluviais e biovaletas.	Griffiths <i>et al.</i> , 2020; Welling & Dalton, 2022.

**Tabela 3** Termos e definições das Infraestruturas Azuis. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

## INFRAESTRUTURAS AZUIS



**Figura 26.** Ilustração com exemplos de IeAs urbanas. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

### 3.2.2 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Conclui-se que as Infraestruturas Azuis podem, de fato, complementar o sistema de drenagem urbana convencional e servir como uma ferramenta valiosa para mitigar impactos abruptos, prevenindo grandes transtornos nas áreas urbanas. No entanto, como mencionado anteriormente, uma infraestrutura isolada tem um impacto limitado na resiliência global de uma cidade; assim, é imperativo estabelecer uma rede interligada dessas estruturas para colher os benefícios mencionados.

Além disso, essas infraestruturas demandam monitoramento contínuo e engajamento ativo por parte dos atores urbanos para operarem de forma eficaz e se tornarem agentes efetivos de resiliência. A relação entre a sociedade e esses equipamentos requer uma mudança na maneira como são percebidos. Em vez de uma postura de desconhecimento, na qual a população está alheia à possibilidade de ocorrência de um evento impactante, a proposta das Infraestruturas Azuis enfatiza a necessidade de ter atores ativos que compreendam a importância e a função desses equipamentos para a segurança urbana.

É valido ressaltar, no entanto, que essa abordagem, focalizada na resiliência às inundações urbanas, pode ter um alcance limitado quando se trata da resiliência de outros sistemas urbanos não abordados aqui. Como destacado pela Rockefeller Foundation (2015), a resiliência é um conceito amplo que engloba aspectos sociais, ecológicos e tecnológicos que compõem o tecido urbano. Assim, nenhuma abordagem única pode ser considerada completa em si mesma, pois a verdadeira resiliência demanda integração e atenção a todos esses componentes.

Portanto, a aplicação das Infraestruturas Azuis representa um passo significativo na busca por cidades mais preparadas para enfrentar desafios climáticos, mas é apenas uma parte de um panorama mais amplo. O caminho para uma resiliência urbana efetiva exige uma abordagem holística que abarque todos os sistemas que compõem a cidade, garantindo sua adaptabilidade e capacidade de resposta diante de eventos diversos e imprevisíveis.

# CAPÍTULO 4

# MODELAGEM DA

# INFORMAÇÃO

# APLICADA À

# PAISAGEM

As SBN emergem como ferramentas para cidades mais resilientes por meio dos serviços ecossistêmicos prestados. Entretanto, quando é que técnicas ou Infraestruturas Azuis se mostram mais adequadas ou viáveis do que abordagens tradicionais cinzas? Qual avaliação pode atestar que o Azul é a solução mais resiliente? Neste contexto, quanta implementação de soluções azuis é necessária, onde, como e para quem? Este Capítulo visa avançar no uso da modelagem da informação aplicada à paisagem como metodologia para abordar essas questões.

# Tópico 4.1

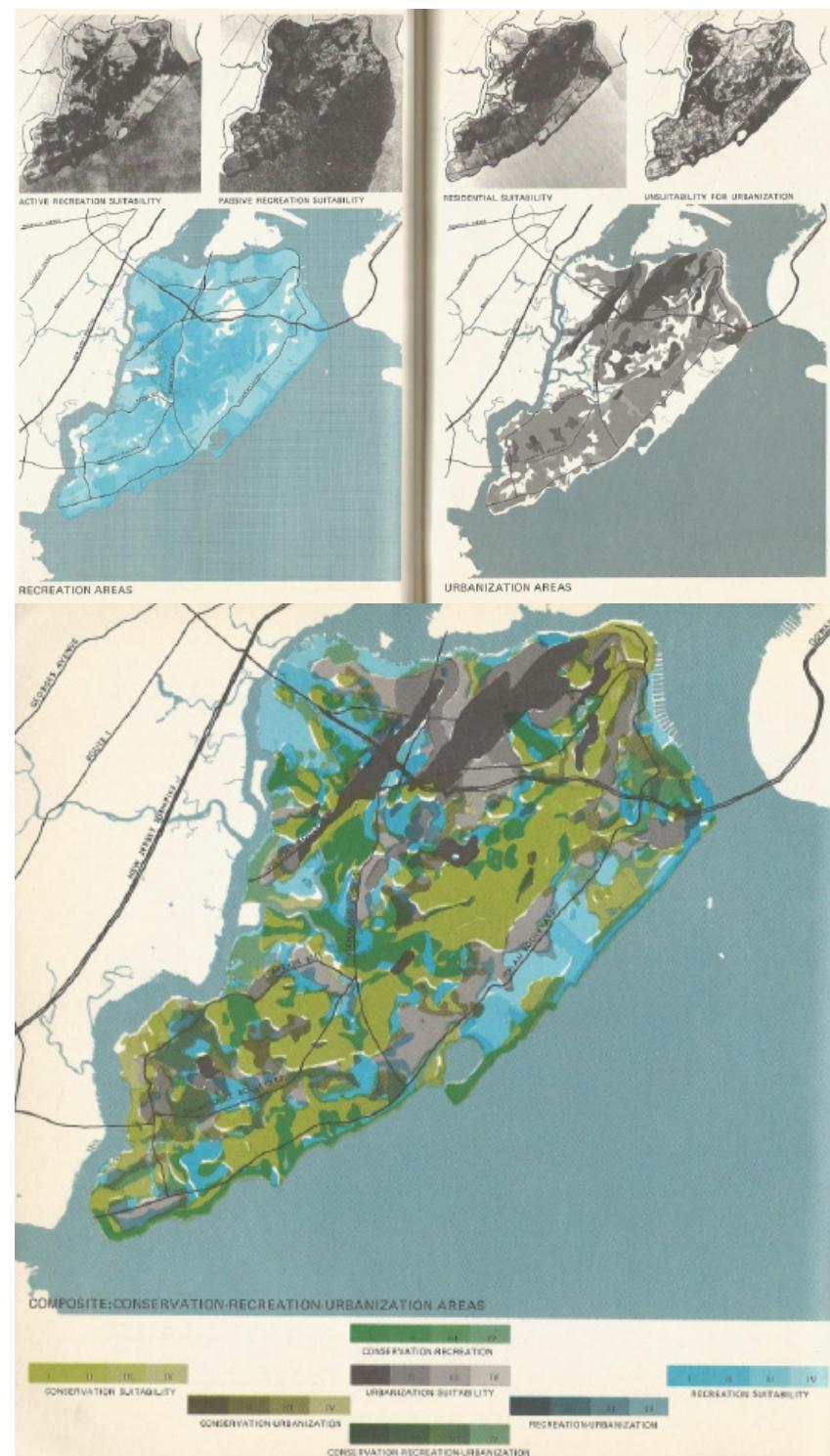
## UMA METODOLOGIA PARA O DESIGN URBANO RESILIENTE

Historicamente, planejadores e gestores têm utilizado mapas como uma ferramenta fundamental para registrar, apresentar e comunicar informações. Essas representações cartográficas acompanharam o desenvolvimento tecnológico da humanidade e, atualmente, possuem um potencial ainda maior para gerar dados e conhecimento (Freitas *et al.*, 2016; Lima, 2017).

Um precursor da forma como se pensa o projeto da paisagem até os dias de hoje, MacHarg (1995), em seu livro *“Design with Nature”*, apresentou uma metodologia, inovadora na época, para um planejamento ecológico. O objetivo de sua abordagem era integrar considerações ecológicas no processo de concepção de projetos paisagísticos, assegurando que o desenvolvimento do ambiente urbano ocorra em harmonia com o ambiente natural. Ele destaca a importância de compreender o contexto ecológico de um sítio e de utilizar esse conhecimento para tomar decisões baseadas em fatos sobre a utilização e o desenvolvimento do terreno.

Ao analisar territórios, McHarg (1995) empregava um processo de zoneamento para identificar a “adequação intrínseca” de cada porção do território estudado, tendo os processos naturais como guias. Esse método envolvia a sobreposição de mapas que abordavam diversos aspectos do território, como recursos hídricos, vegetação, fauna, patrimônio etc., usando técnicas computacionais para estabelecer uma relação ponderada entre eles. Isso culminou na criação do “mapa de aptidão” (*suitability map*), no qual diferentes zonas, representadas por cores distintas, indicavam a propensão natural de cada área para usos específicos, como recreação, agricultura, habitação, indústria, entre outros. Esse método é adaptável e pode ser aplicado em várias escalas e contextos de planejamento e projeto para atender a diferentes necessidades (Figura 27).

A segmentação de zonas mais apropriadas para determinados usos deriva da noção de “aptidão” (*fitness*), a qual McHarg assimila dos pesquisadores que ele chama de Naturalistas. O propósito da aptidão é aprimorar a vida e a evolução, sendo um ecossistema mais saudável quanto maior sua aptidão. Assim, McHarg sustenta a crença de que o homem é capaz de projetar ecossistemas mais aptos. Pode-se inferir, então, que um território mais apto também é um território mais resiliente, pois está mais integrado às diferentes forças naturais e humanas que o influenciam.



**Figura 27.** Mapas de Aptidão realizados com a metodologia do Geodesign para a Staten Island nos Estados Unidos da America. Fonte: McHarg, 1995.

McHarg comprehende o território da cidade como uma forma, moldada pela evolução geológica e biológica, adaptada pelos seres humanos, e que ele requer o reconhecimento de seu desenvolvimento histórico como uma sequência de adaptações culturais. Algumas dessas adaptações perduram e integram o inventário de valores, enquanto outras sucumbem como tentativas malsucedidas, constituindo a base de uma investigação sobre a forma pré-existente, a identidade natural e a forma produzida, ou seja, a cidade criada.

**Os pontos e questões considerados pertinentes na metodologia de McHarg são:**

- Os processos naturais como parte integrante do funcionamento das cidades, contribuindo para a produção de valor social;
- A capacidade do homem de compreender e projetar a paisagem como uma forma mensurável, com o intuito de contribuir para seu funcionamento;
- A importância da delimitação de zonas que desempenham múltiplas funções e que promovam diferentes ecossistemas sociais e naturais.

Seus projetos tinham como objetivo geral soluções que trouxessem o máximo de benefício social com menor custo social possível.

Embora não sejam diretamente centrados no paisagismo ecológico, eles serviram de inspiração para autores como Spirn (1995), Hough (2006), Forman (2014), Novotny (2010) e Holzman & Cantrell (2015), expoentes que convergem no entendimento de que as cidades devem estabelecer uma relação harmoniosa de intercâmbio com os ecossistemas naturais que as circundam, coexistindo em simbiose. Eles compartilham a visão de que a rejeição da natureza por parte dos projetistas acarreta malefícios à humanidade, tais como inundações, deslizamentos e a poluição do ar e da água. Partindo desse entendimento, passa-se a defender o valor social da natureza, propondo que o mesmo seja quantificado e integrado aos próprios projetos urbanos.

Spirn (1995) ressalta a importância da coleta e utilização de informações abrangentes sobre os diversos aspectos que compõem a cidade:

A informação correta, atualizada e suficientemente detalhada é essencial para a percepção da cidade como um todo. (...) Sem essa informação, qualquer plano para projetar a cidade que tenha em mente a natureza está prejudicado; com essa informação, novos enfoques e novas soluções são possíveis. Saber qual informação recolher e como a coletar e armazenar e decidir quem será responsável por sua administração são cruciais para o sucesso. (Spirn, 1995, p. 279)

Com a evolução dos projetos territoriais e a transição do uso de mapas em papel, como apresentado pela teoria de McHarg, surgiu o Sistema de Informação Geográfica (SIG). Desde os anos de 1990, sistemas computacionais capazes de lidar com dados georreferenciados estão em uso para a coleta e manipulação de informações sobre as urbes. O SIG é amplamente empregado para organizar dados territoriais. Ele funciona como um sistema de computador que gerencia bancos de dados complexos conectados a elementos gráficos georreferenciados. Este sistema processa dados de três maneiras: a) dados geográficos comuns

em mapas; b) características ou atributos, predominantemente compostos por valores alfanuméricos, armazenados visualmente em tabelas; c) e as relações espaciais entre elementos, também conhecidas como relações topológicas. O SIG permite aos planejadores o armazenamento de dados, a criação de diagnósticos territoriais e a análise de informações espaciais (Freitas *et al.*, 2016).

O SIG em si não representa uma metodologia, muito menos uma metodologia específica para o *design* urbano resiliente. No entanto, sua existência transformou significativamente a abordagem do *design* de paisagens. Anteriormente limitados a pranchetas (sejam físicas ou virtuais), os planejadores passaram a utilizar um sistema com uma capacidade de gerenciamento de dados exponencialmente maior. A própria natureza desses dados foi alterada com a introdução de tecnologias como o acesso à captura de imagens por satélites. Como resultado, os SIGs catalisaram o desenvolvimento de abordagens metodológicas inovadoras para o projeto urbano. Essa transição promoveu uma mudança radical na gestão de informações pelos profissionais, fomentando a criação de metodologias adaptativas diante da complexidade e da vastidão de dados existentes. Isso tornou metodologias, como a proposta por McHarg, mais acessíveis, validando sua visão prospectiva.

A partir dos SIGs, emergem novas abordagens metodológicas para a paisagem, entre elas o Geodesign (Steinitz, 1990), que começou a se desenvolver na década de 1990 e estabeleceu um *framework* em 2012 com o lançamento do livro “*A Framework For Geodesign*” (Steinitz, 2012). A teoria do Geodesign amplia o processo de *design* territorial para além da mera cartografia, enxergando-o como um processo dinâmico, não estático. Steinitz, em seu livro, destaca que o *design* da paisagem não pode se basear em uma única metodologia, pois implica projetos diversos em dimensão, escala, cultura, conteúdo e tempo.

O conceito do Geodesign define que todo projeto é fundamentado no ponto de vista dos atores que fazem parte da sua construção, sendo esse processo não singular e não linear. O *framework* do Geodesign consiste em três ciclos para alcançar três objetivos diferentes: a) entender o escopo do estudo; b) definir a metodologia de trabalho; c) e executar o estudo.

Em cada ciclo, seis questões são retomadas, como ilustrado na Figura 28. A sequência temporal aparenta ser linear, mas, na aplicação prática, ela acontece de forma mais desorganizada a partir do estudo de cenários e da realização de revisões.

Além disso, Steinitz atribui grande importância à estruturação dos participantes envolvidos no processo de projeto. O Geodesign fundamenta-se na interação entre as “pessoas do local” (os atores locais do território em questão), os tecnólogos da informação, cientistas da geografia humana e ambiental e os profissionais que projetam o ambiente. A metodologia enfatiza a importância crítica dessa interação entre esses diferentes agentes, sendo ela o ponto de partida para a concepção do projeto.

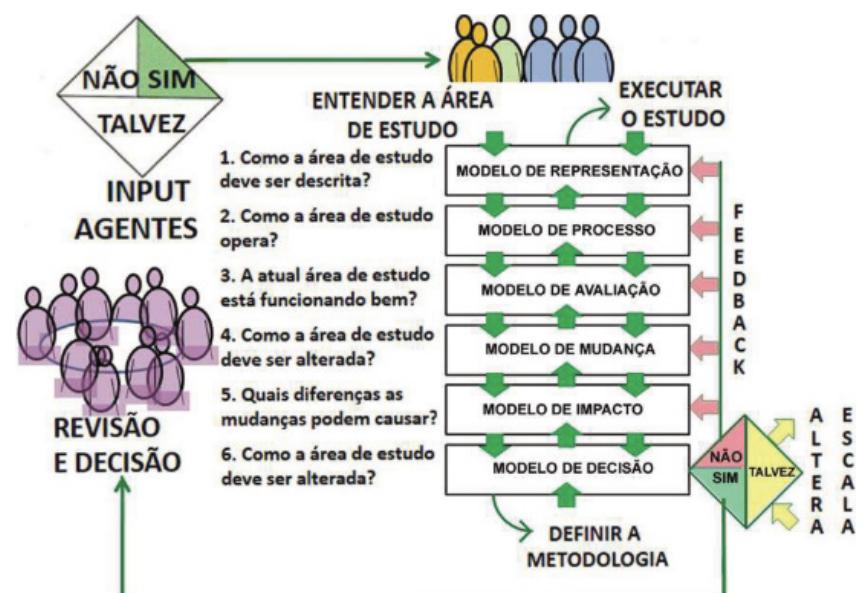


Figura 28. Ilustração com os Atores, a equipe de Geodesign e o Framework para o Geodesign. Fonte: Steinitz, 2012.

**O Geodesign é uma metodologia pertinente a ser estudada, pois ela traz para o projeto da paisagem questões fundamentais, entre as quais estão:**

- A necessidade imperativa de promover o cruzamento entre profissionais de diversas especialidades e origens;
- A vital importância das pessoas do lugar como agentes decisórios essenciais em qualquer projeto;
- O objeto de estudo enquanto território de múltiplas escalas, dentre as quais estão: dimensão, território, cultura, conteúdo e tempo;
- O projeto como um processo de trabalho não linear;
- A utilização da criação de cenários como uma ferramenta fundamental no processo de projeto. Segundo Steinitz, “(...) um cenário em Geodesign é um esboço para um futuro hipotético do contexto geográfico do estudo” (2016, p. 40).

Contudo, o Geodesign, por ter a característica intrínseca de não trabalhar um objeto específico, não tem um foco declarado na resolução de questões urbanas para uma cidade resiliente, muito menos uma cidade resiliente a inundações. Apesar disso, existem pesquisas que abordam estas questões tendo o Geodesign como metodologia (Wu & Chiang, 2018).

Baseado no Geodesign, Novotny (2010) propõe uma metodologia específica para o planejamento de cidades sustentáveis e resilientes. A partir de suas referências, ele desenvolveu uma metodologia direcionada especificamente para abordar questões relacionadas à busca de soluções mais resilientes para cidades. Ele procura tornar mais tangível e racional um projeto de paisagismo que envolve o planejamento de ecossistemas, utilizando as Melhores Práticas de Manejo e Infraestruturas Verdes como ferramentas-chave. A racionalização da natureza como provedora de serviços sociais é pertinente aqui, pois, sem essa abordagem, é impossível quantificar ganhos ou a ausência deles.

O modelo proposto por Novotny (2010) concentra-se de maneira específica no fornecimento de serviços ecossistêmicos, encontrando soluções nas Melhores Práticas de Manejo como ponto de partida para decisões relacionadas a projetos. A abordagem parte do atendimento a esses serviços, considerando em seguida questões relacionadas à viabilidade econômica, aceitação pública e condições pré-existentes.

Assim como McHarg (1995), Novotny emprega a criação de cenários futuros para a seleção da melhor solução possível. Ele incorpora em sua proposta o conceito de indicadores-chave que servem como termômetros para monitorar o atendimento aos serviços ecossistêmicos, sendo adaptativos à evolução constante do processo de planejamento. Os fundamentos desta metodologia estão ancorados em cinco temas principais: a) orientação por objetivos e base em serviços ecossistêmicos; b) abordagem estratégica; c) orientação por cenários; d) abordagem transdisciplinar; e) adaptabilidade. Neste contexto, os problemas ambientais urbanos já constituem uma realidade amplamente reconhecida por pesquisadores, governos e sociedade.

Assim, propõe-se um urbanismo “centrado na água”, o qual destaca a importância de gerenciar as águas urbanas com o objetivo principal de alcançar sustentabilidade ecológica e hidrológica, promovendo o desenvolvimento sustentável e a proteção de zonas ripárias. Argumenta-se que o desenvolvimento verde e as cidades ecológicas não são luxos, mas sim soluções essenciais para os atuais desafios urbanos,

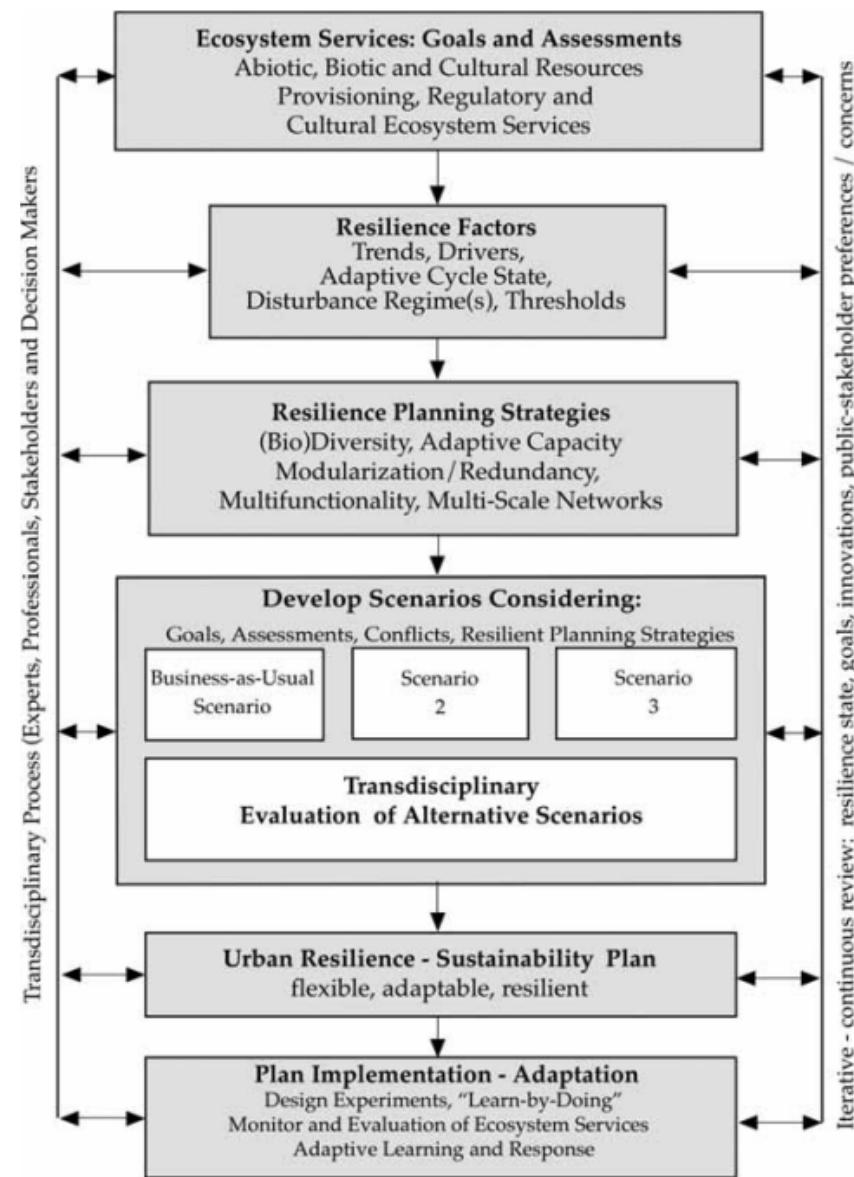
apresentando modelos potenciais para lidar com problemas citadinos e orientar futuros esforços de renovação urbana.

**Da metodologia de Novotny, destaca-se:**

- A água é não apenas um fator importante, mas também central no planejamento urbano;
  - Os serviços ecossistêmicos são considerados ponto de partida essencial para o desenvolvimento de cidades resilientes;
  - O uso das Infraestruturas Verdes como ferramentas;
  - A utilização de cenários se destaca como uma ferramenta para a comparação e execução de projetos urbanos mais eficientes;
  - A incorporação de indicadores-chave para avaliar o desempenho desses projetos;
  - A transdisciplinaridade é apontada como uma necessidade no contexto do planejamento urbano;
  - Entende-se o planejamento como um processo contínuo, baseado na premissa da constante mudança e adaptação.

A trajetória descrita neste tópico representa um caminho tomado por *designers* da paisagem na construção do “planejar espaço”, destacando-se duas abordagens específicas de Steinitz e Novotny que abordam o planejamento do espaço de maneiras distintas. Assim, enquanto Steinitz (2012) enfatiza a importância do planejamento do espaço por diversos atores, Novotny (2010) inicia seu enfoque a partir dos serviços ecossistêmicos. Cada metodologia está inserida em um contexto tecnológico e cultural específico, indicando que as abordagens para planejar o espaço não são universais, mas moldadas pelas circunstâncias e condições locais e temporais. Isso ressalta que o espaço não se trata só dos objetos geográficos, naturais e artificiais, mas também da sociedade que o habita (Santos, 1988) (Figura 30). Dessa forma, à medida que a sociedade evolui em sua tecnologia e relações, a forma de pensar o espaço também deve evoluir para incorporar essas novas complexidades, evidenciando a necessidade de uma abordagem flexível e adaptável no planejamento do espaço a fim de lidar com as mudanças contínuas nas condições sociais, culturais e tecnológicas. Ao refletir sobre essa trajetória, surge a questão do que está por vir no planejamento da paisagem e quais mudanças tecnológicas enfrentarão os desafios dos novos espaços.

Cantrell (2017) argumenta que uma mudança de paradigma teve início na virada do século XX para o século XXI, propondo uma nova perspectiva no *design* da paisagem. Ele destaca a capacidade das novas tecnologias em lidar com as qualidades dinâmicas e temporais da paisagem, expandindo as possibilidades de manipulação de sistemas vegetativos, hidrológicos e estratigráficos. A habilidade proporcionada pelas inovações tecnológicas de catalogar e responder aos fenômenos ambientais abre caminho para novas metodologias no “planejar espaço”, tema que será explorado no próximo tópico.



**Figura 29.** Fluxograma com o método de planejamento para cidades resilientes e sustentáveis segundo Novotny. Fonte: Novotny, 2010.



**Figura 30.** *Mapa mundi feito pelo IBGE: coloca o Brasil no centro do mundo.*

**Figura 30.** Mapa mundial feito pelo IBGE, coloca o Brasil no centro do mundo.  
Fonte: <<https://www.estadao.com.br/ciencia/ibge-mapa-brasil-atlas-centro-g20-marcio-nochmann-cartografia-npprm/>> Acesso em: 11 maio. 2024.

## Tópico 4.2

### CARACTERIZAÇÃO DO LIM

Modelos para visualização e simulação de cenários e análise de dados não são novos no campo do planejamento e *design* de paisagem. Seus primeiros anos coincidiram com o início da era das visualizações digitais e, a partir de então, eles têm contribuído não apenas para avanços na representação, avaliação e tomada de decisões, mas também para estabelecer novas éticas que foram progressivamente perseguidas desde as primeiras abordagens à ecologia (Lange, 2011).

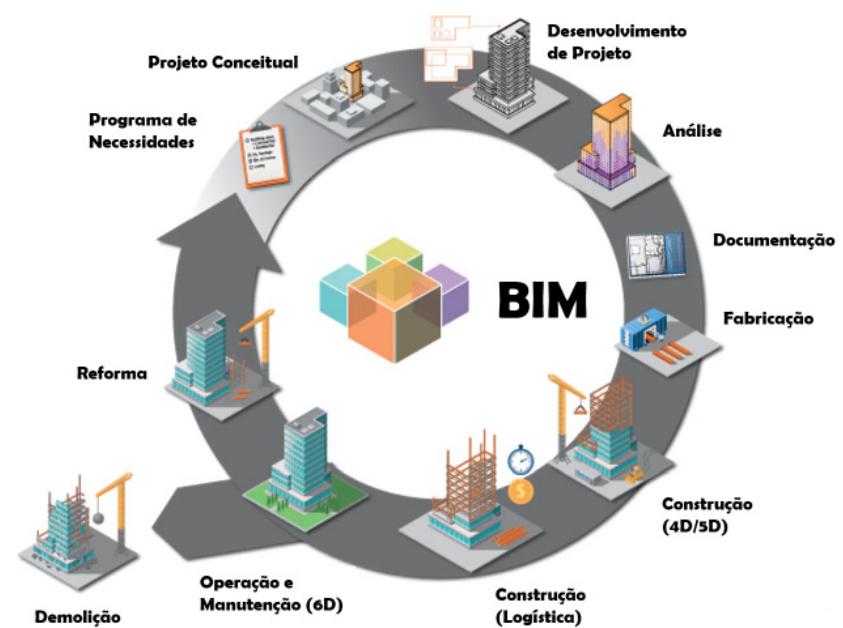
Após a metodologia de análise de adequação de uso do solo de McHarg, com a aplicação da tecnologia da computação no planejamento de paisagem, a disponibilidade de SIGs e a criação de novas legislações ambientais para a prevenção e recuperação de impactos ambientais, amplas possibilidades tornaram-se disponíveis para profissionais de paisagismo avaliarem e agirem em escalas maiores, conectando as dimensões ambientais e de *design* da paisagem (Yang & Li, 2016).

Contudo, a interface básica comumente utilizada dos SIGs carece de ferramentas simples para a projeção de cenários e para simplificar a sistematização de padrões urbanos, sendo mais evidente no planejamento da paisagem, especialmente em escalas detalhadas. O SIG, muitas vezes utilizado em fases de projeto em larga escala, seguido por programas CAD tradicionais para detalhamentos mais precisos, enfrenta o desafio da natureza estática do *design* citadino, incapaz de refletir mudanças automáticas nos *inputs*. Isso é particularmente problemático para o planejamento urbano, considerando a dinâmica constante das cidades diante de eventos recorrentes como secas e enchentes.

Enquanto isso, no campo da Arquitetura e Engenharia, com significativos reflexos na paisagem e urbanismo, o *Design Assistido por Computador* (CAD) surgiu no início da década de 1960 como uma interface gráfica voltada principalmente para o *design* de edifícios. A partir de suas primeiras versões, o CAD proporcionou muita liberdade de criação ao usuário na interação homem-computador, mas ficou limitado à representação de vetores como tipos de linha associados a camadas identificadas.

Em 1975, como uma superação progressiva dessa limitação, a prerrogativa fundamental do Modelagem da Informação da Construção (BIM) foi definida, e o primeiro programa BIM, o ArchiCAD, foi criado em 1983. Desde que o BIM surgiu, uma série de informações que permaneciam ocultas ou perdidas em processos de *design* tradicionais tornaram-se acessíveis.

De acordo com Eastman *et. al* (2008), o BIM trouxe o benefício de uma única fonte de dados que comprehende dois componentes principais: (i) uma reprodução gráfica tridimensional da geometria do edifício (modelo), a partir do qual desenhos técnicos 2D podem ser extraídos; (ii) um banco de dados integrado no qual todas as informações, propriedades, relacionamentos e apresentações são armazenadas. Integrando modelagem gráfica e de banco de dados e apoiando múltiplos participantes no processo de *design*, o BIM colaborou para otimizar os processos na construção, os quais envolviam (e ainda envolvem) desde a tomada de decisões de *design*, produção de informações de alta qualidade, projeção de desempenho e estimativa de custos até o planejamento da construção (Penttilä, 2006; Eastman *et. al.*, 2008).



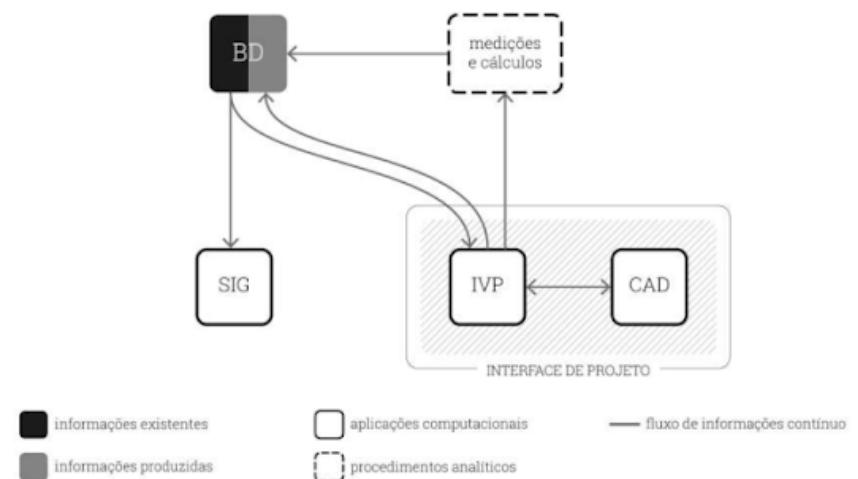
**Figura 31.** Ilustração com etapas do BIM. Fonte: <<https://www.depi.unicamp.br/implementacao-de-bim-building-information-modeling-na-unicamp/>>. Acesso em: 26 set. 2024.

Também no planejamento da cidade, o uso da modelagem da informação tem encontrado seu espaço. Em 2012, Beirão elaborou o sistema chamado “Modelagem da Informação da Cidade” (CIM - *City Information Modeling*) paralelamente ao termo já aceito: *Building Information Modelling*, e, a partir da relação do já usado sistema SIG com o sistema CAD, foi criada uma plataforma híbrida (Lima, 2017): o CIM, modelo que, tal qual o BIM, une as informações das diferentes camadas territoriais já presentes na plataforma SIG às possibilidades de modelagem de uma plataforma CAD, podendo ser elaborados cenários para uma situação de forma mais efetiva e rápida, gerando análises e simulações de diferentes mecanismos da cidade (Sousa, 2018).

O sistema CIM, a partir da pesquisa de Beirão (2012), consiste na gestão da informação por um Sistema Gerenciador de Bancos de Dados (SGBD), conectando-o a um *software CAD* incorporado a uma Interface Visual de Programação (IVP) e, de forma a visualizar estes dados, a um Sistema de Informação.

A adoção de sistemas baseados em tecnologias da informação representa um avanço significativo para os profissionais envolvidos na gestão e no planejamento das cidades contemporâneas (Moura *et al.*, 2018; Freitas *et al.*, 2016). A modelagem da informação surge como um campo promissor de pesquisa e prática, permitindo simulações complexas das soluções propostas considerando tempo, faseamento e entropia (Cantrell & Holzman, 2015).

Para entender o espaço que a paisagem ocupa atualmente no estudo da MI, foi realizada uma revisão da literatura sobre Modelagem da Informação Aplicada à Paisagem (LIM), a qual foi abordada no Capítulo 2. Como resultado, foram elencados artigos pontuais considerados pertinentes para o presente trabalho, dando importância ao tema, ao recorte de estudo e à abordagem metodológica (Tabela 4).



**Figura 32.** Ilustração da estrutura CIM segundo Beirão. Fonte: Beirão, 2012.

ANO	METODOLOGIA	RESULTADOS SOBRE O LIM	AUTORES
1979	Conectando dados, por meio de uma classificação consistente, provenientes das seguintes fontes: informações arquivadas, plantas de escritório de levantamento topográfico, entrevistas e fotografias aéreas.	Houve um aumento considerável no número de modelos de simulação relacionados ao gerenciamento do uso da terra. A principal razão para a tendência de tais modelos apresentarem desempenho insatisfatório é a falta de informações adequadas sobre variáveis exógenas, como informações sobre a mudança no uso da terra ao longo do tempo.	Earle <i>et. al.</i>
2001	Complicações e possibilidades de técnicas digitais para representação topográfica levam a comentários generalizados sobre as promessas e problemas da modelagem da paisagem, destacando tópicos de pesquisa para auxiliar na busca pelo tópico da modelagem da paisagem.	Entre esses tópicos de pesquisa, destaca-se o uso de métodos algorítmicos modernos (estruturas de dados, construções de programação etc.), por meio de uma colaboração ativa e informada com cientistas da computação e informação.	Ervin, S.
2001	Testando o nível de realismo em programas de visualização 3D digitais em um estudo de caso que utiliza uma abordagem baseada em SIG para uma visualização funcional de grandes conjuntos de dados.	A modelagem 3D deve estar associada às plataformas de informação SIG para criar representações do mundo real que possam fornecer imagens intimamente ligadas à experiência humana direta, tanto para especialistas quanto para não especialistas, assim como para moradores locais e não locais.	Lange, E.
2011	Examina o que foi estudado no <i>design</i> urbano de paisagens relacionado a novas tecnologias (1974-2011). Em seguida, teoriza sobre a perspectiva futura para novas tecnologias no <i>design</i> urbano de paisagens, com foco em plataformas 3D.	A visualização 3D deve estar conectada a modelos de enchentes, modelos de mudanças climáticas, modelos econômicos e outros a fim de enriquecer a experiência de planejamento de paisagens.	Lange, E.
2016	O artigo propõe um método de urbanismo paisagístico paramétrico que utiliza algoritmos evolutivos para gerar parâmetros otimizados de um plano diretor. A metodologia envolve três etapas principais: 1) definição das restrições do local, incluindo clima, topografia e acessibilidade; 2) geração de geometria computacional, utilizando ferramentas como Rhino, Grasshopper e curvas NURBS para modelagem paramétrica; e 3) processo de otimização, no qual o motor de resolução evolutiva Galapagos ajusta parâmetros para maximizar áreas verdes e minimizar construções. As iterações criadas foram analisadas quanto à adequação das soluções baseadas em critérios de sustentabilidade e densidade populacional.	O método demonstrou flexibilidade para ser aplicado em diferentes contextos, com a possibilidade de ajustes nos parâmetros para atender a novos desafios, como infraestrutura e gestão de água e resíduos. O estudo reforça que os algoritmos evolutivos oferecem múltiplas opções, mas a decisão final requer a experiência do <i>designer</i> para avaliar a adequação das soluções geradas.	Yazici.
2017	Esboçando as premissas básicas dos modelos de paisagem, descrevendo sua utilidade e limitações, e resumindo as formas básicas dos modelos de paisagem.	Modelos de paisagem que incorporam informações no tempo e no espaço oferecem um melhor suporte para conservação e gerenciamento da paisagem. A modelagem deve visar uma compreensão melhor de como as mudanças na paisagem podem afetar a biodiversidade.	Scheller, R.
2018	Examinando a relação entre o <i>design</i> de paisagens urbanas e novas tecnologias.	Reconhece a impraticabilidade de implementar criadores de áreas naturais autônomos em grande escala e questiona se a área natural criada pode replicar verdadeiramente o significado social, político e espiritual das áreas verdadeiramente naturais.	Cantrell & Mekies.
2018	Utiliza a modelagem paramétrica como ferramenta para a modelagem e avaliação de uma bacia de retenção na cidade de São Paulo.	Ao aliar performance a <i>design</i> computacional, este trabalho alcançou uma linguagem prospectiva para a arquitetura paisagística em consonância com as exigências da engenharia hidráulica, podendo ser vislumbrada uma morfologia inovadora capaz de integrar as diversas funções que se esperam para os espaços urbanos, como áreas que conjugam o papel da infraestrutura com as necessidades de uso social e estético e que estimulam paisagem urbanas mais vibrantes e valorizadas.	Moura <i>et al.</i>

ANO	METODOLOGIA	RESULTADOS SOBRE O LIM	AUTORES
2019	O trabalho apresenta um <i>framework</i> de modelagem para visualizar e operacionalizar a vulnerabilidade decorrente de decisões sociopolíticas e institucionais. Isso se dá pela modelagem de um indicador de vulnerabilidade urbana.	Independentemente dos modelos específicos para representar a vulnerabilidade urbana, eles devem ser utilizados em um contexto em que possam ser empregados para explorar e abranger incertezas, em vez de simplesmente fornecer previsões de cenários climáticos futuros. Isso deve conduzir a discussões abertas e transparentes com as partes interessadas sobre problemas comuns, práticas atuais e possíveis caminhos a seguir, utilizando a melhor informação disponível.	Baeza <i>et al.</i>
2019	Neste estudo, elementos dos processos de águas pluviais são simulados utilizando o modelo de intensidade de tempestade de chuva, o modelo exponencial de erosão e o algoritmo de janela-dividida. Os <i>softwares</i> SIG e SWMM ( <i>Storm Water Management Model</i> ) são utilizados para simular a distribuição espacial de precipitações intensas de curta duração, intensidade de tempestades de chuva, redes de drenagem e instalações de desenvolvimento de baixo impacto (LID) em diferentes períodos de recorrência.	Um modelo de integração em quatro dimensões, com uma dimensão temporal, deve ser construído para integrar organicamente os dados do SWMM e do SIG, aproveitando as vantagens tanto do processo de evolução de águas pluviais do SWMM quanto da diferenciação espacial do SIG.	Hou <i>et al.</i>
2020	Apresenta uma ferramenta de realidade virtual para a visualização da dinâmica espacial de infraestruturas urbanas.	Fornecer informações espaciais sobre a dinâmica do sistema de infraestrutura urbana para os seus atores será fundamental para gerenciar a infraestrutura urbana envelhecida de maneira eficiente e coordenada.	Ma <i>et al.</i>
2020	Esse estudo desenvolveu um novo <i>framework</i> para a interconexão entre risco, humano e infraestrutura, que possibilita a modelagem integrada de processos estocásticos de cenários de risco, elementos de tomada de decisão nos processos de planejamento de adaptação de entidades que proveem serviços públicos e processos dinâmicos de desempenho da infraestrutura de abastecimento de água.	Em termos de contribuição computacional, foi desenvolvido um modelo estático de simulação computacional com base nos comportamentos abstratos e interações entre os elementos de risco, humano e infraestrutura, tendo dados não especializados como resultado. Esse modelo captura os impactos acoplados de riscos induzidos pelo aumento do nível do mar (SLR) e processos de planejamento de adaptação na resiliência de longo prazo das infraestruturas de abastecimento de água.	Rasoulkhani <i>et al.</i>
2020	Propõe uma plataforma digital que se estrutura como uma ferramenta para integrar e operacionalizar os projetos complementares de paisagem e de projeto, capaz de simular aspectos dos espaços projetados, compatibilizando elementos construídos e processos naturais.	Propõe um plano para uma plataforma LIM que utiliza diferentes ferramentas colaborativas, <i>softwares</i> e <i>plugins</i> acoplados para permitir a visualização tridimensional <i>online</i> das alternativas de projetos e a geração de diferentes dados de desempenho para cada uma delas.	Sandre & Pellegrino.
2020	Os pesquisadores introduzem uma <i>toolbox</i> de código aberto do ArcGIS, mais especificamente a <i>toolbox</i> do <i>Gravity Model</i> , uma ferramenta programada no ArcGIS projetada para mapear e priorizar os corredores verdes urbanos potenciais.	A <i>toolbox</i> integra ecologia da paisagem, teoria dos grafos e modelagem espacial. Em geral, os usuários podem utilizar a ferramenta aceitando ou modificando os parâmetros padrão para atender às suas demandas. Também podem criar novas ferramentas de <i>script</i> modificando o código ou adicionando parâmetros às ferramentas para atender às exigências de seus estudos. No entanto, isso exigirá alguma experiência em programação por parte dos usuários.	Wanghe <i>et al.</i>
2021	Propõe a expansão da capacidade de modelos IFC para a incorporação de infraestrutura de projetos de paisagem e dados GIS, de modo a aplicar a metodologia BIM também para projetos de paisagismo.	Defende o desenvolvimento de modelos IFC que possam trabalhar a união entre os sistemas SIG e BIM para a modelagem da informação aplicada à paisagem.	Borkowski & Wyszomirski.
2021	Apresenta um estudo de caso que propõe um fluxo de trabalho com o uso de programas BIM, para a incorporação do trabalho do paisagista nos projetos BIM, sejam eles de edifício ou paisagísticos.	Possibilidade do uso do Grasshopper para extração de parâmetros referentes a espécies vegetais. Interoperabilidade entre Rhinoceros, Grasshopper e programa BIM na criação de biblioteca de vegetação.	Gobeawan <i>et al.</i>

ANO	METODOLOGIA	RESULTADOS SOBRE O LIM	AUTORES
2021	Ao lidar com o planejamento e <i>design</i> regional em vários níveis, este artigo concentra-se principalmente na pesquisa de tecnologia de <i>design</i> paramétrico em arquitetura paisagística.	O estudo resume o desenvolvimento do <i>design</i> paramétrico na arquitetura paisagística, combinando de maneira inovadora o <i>design</i> paramétrico e o <i>design</i> de arquitetura paisagística, fundamentado em teorias relevantes. Isso comprova plenamente a viabilidade do <i>design</i> de arquitetura paisagística. Para potencializar a inteligência dos dados, a integração com SIG (Sistema de Informação Geográfica) permite uma análise mais eficiente e a obtenção aprimorada dos dados.	Guo <i>et al.</i>
2021	Com base em camadas de SIG, imagens de satélite e conjuntos de dados quantitativos derivados de observações de campo, foram integrados dados ecológicos empíricos e quantitativos sobre composição, padrão e processos da vegetação em um local de Pesquisa Ecológica de Longo Prazo (LTER) em Israel com uma representação computadorizada tridimensional de paisagens atuais e futuras.	Isso representa a integração e tradução de diferentes fontes de conhecimento de maneira a preencher a lacuna entre a pesquisa em ecologia da paisagem e seu valor aplicado para gestão e planejamento.	Hadar <i>et al.</i>
2021	O estudo analisa a definição, características e principais conceitos da modelagem paramétrica no contexto do <i>design</i> paisagístico. Ele compara fluxos de trabalho paramétricos com métodos tradicionais, abordando a evolução do uso de tecnologias digitais em projetos. O enfoque foi na análise de casos de aplicação prática em empresas nacionais e internacionais, visando compreender o impacto e as possibilidades de uso dessas ferramentas. A pesquisa também avalia os desafios enfrentados na modelagem de objetos complexos, como árvores, e propõe a criação de bibliotecas BIM ( <i>Building Information Modeling</i> ) específicas para superar essas limitações.	Os resultados mostram que a modelagem paramétrica é uma ferramenta eficaz para integrar variáveis complexas e dinâmicas em projetos paisagísticos, promovendo soluções inovadoras. Apesar disso, foram identificadas lacunas, como a falta de conteúdo específico para objetos naturais e a inconsistência de padrões entre diferentes bibliotecas. O estudo sugere que a adoção de bibliotecas parametrizadas, com atributos detalhados para elementos naturais, pode melhorar a precisão e a funcionalidade dos projetos em BIM no setor de paisagismo.	Na.
2022	Este estudo tem como objetivo avaliar quantitativa e automaticamente os Índices de Visão da Janela (WVIs) por meio do uso de um sistema de Modelagem da Informação da Cidade (CIM) fotorrealista.	O método de avaliação automática proposto com base no CIM pôde gerar de forma eficaz quatro índices principais de visão para quantificar e analisar as vistas urbanas através das janelas.	Li <i>et al.</i>
2022	Os pesquisadores desenvolveram uma visualização paisagística em 4D da bacia hidrográfica de Crummock Water, no Parque Nacional Lake District, na Inglaterra. A visualização abrange 14.000 anos de evolução da paisagem, destacando 140 anos de engenharia de reservatórios e explorando cenários futuros de renaturalização, como a remoção de barragens e a renaturalização do rio.	O estudo demonstrou que apresentar informações sobre a evolução da paisagem em um ambiente de visualização em 4D pode alterar as linhas de base ambientais e, consequentemente, modificar as atitudes em relação ao gerenciamento ambiental.	Hughes <i>et al.</i>
2023	O estudo aplica um método de <i>design</i> paramétrico para modelar a forma espacial de distritos históricos em cidades-ilhas, com foco na Vila de Taipa, Macau. A metodologia envolveu a coleta de dados espaciais detalhados, como largura de ruas, profundidade de quarteirões, altura e orientação de edifícios. Esses dados foram processados na plataforma Grasshopper, utilizando algoritmos genéticos para otimização. O objetivo era gerar modelos urbanos que equilibrassem características históricas e requisitos contemporâneos.	Os resultados mostraram que o <i>design</i> gerado manteve características espaciais históricas, como a rede de ruas e a escala de edifícios, enquanto incorporava melhorias para atender às necessidades modernas. A aplicação de algoritmos genéticos possibilitou iterar múltiplas combinações paramétricas, otimizando a densidade construída e ampliando espaços paisagísticos. A abordagem demonstrou potencial para replicação em outros distritos históricos e novos desenvolvimentos urbanos, desde que ajustada às características locais.	Chen <i>et al.</i>
2024	O estudo utilizou uma revisão de literatura e análise de estudos de caso para examinar as aplicações recentes de gêmeos digitais integrados à Inteligência Artificial (IA) em sistemas de drenagem urbana em cidades inteligentes. A metodologia também analisou fluxos de trabalho existentes e características de gêmeos digitais, incluindo a integração de sensores IoT, dados históricos, modelagem em tempo real e algoritmos de aprendizado de máquina.	O estudo mostrou que gêmeos digitais aprimorados com IA podem otimizar sistemas de drenagem urbana ao prever fluxos de águas pluviais, ajustar operações em tempo real e identificar áreas críticas para manutenção preventiva. A análise de cenários permitiu equilibrar múltiplos objetivos, como mitigação de inundações, qualidade da água e custos, promovendo decisões informadas. Além disso, a visualização em tempo real e simulações facilitaram a colaboração entre <i>stakeholders</i> . Contudo, ainda existem desafios na integração de infraestrutura descentralizada e na maturidade da gestão da qualidade da água.	Sharifi <i>et al.</i>

**Tabela 4** Metodologia e resultado dos artigos considerados relevantes para o entendimento do LIM. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Chegou-se a algumas características pertinentes à Modelagem da Informação Aplicada à Paisagem. Primeiramente, que uma metodologia baseada no uso de ferramentas LIM:

- Deve trabalhar com diferentes escalas, tendo como base uma abordagem GIS, mas que também se utiliza de modelagem 3D em diferentes escalas;
- Exigência do uso de dados atualizados e, preferencialmente, alimentados em tempo real para garantir impacto real e positivo nos projetos;
- Estará atrelada à intercomunicação entre diferentes programas, sendo esta interação não-linear e particular à cada caso;
- Tem a modelagem paramétrica<sup>1</sup> e/ou a modelagem com o uso de inteligência artificial<sup>2</sup> como fator fundamental para o entender e, consequentemente, para projetar paisagens complexas e em constante mudança.

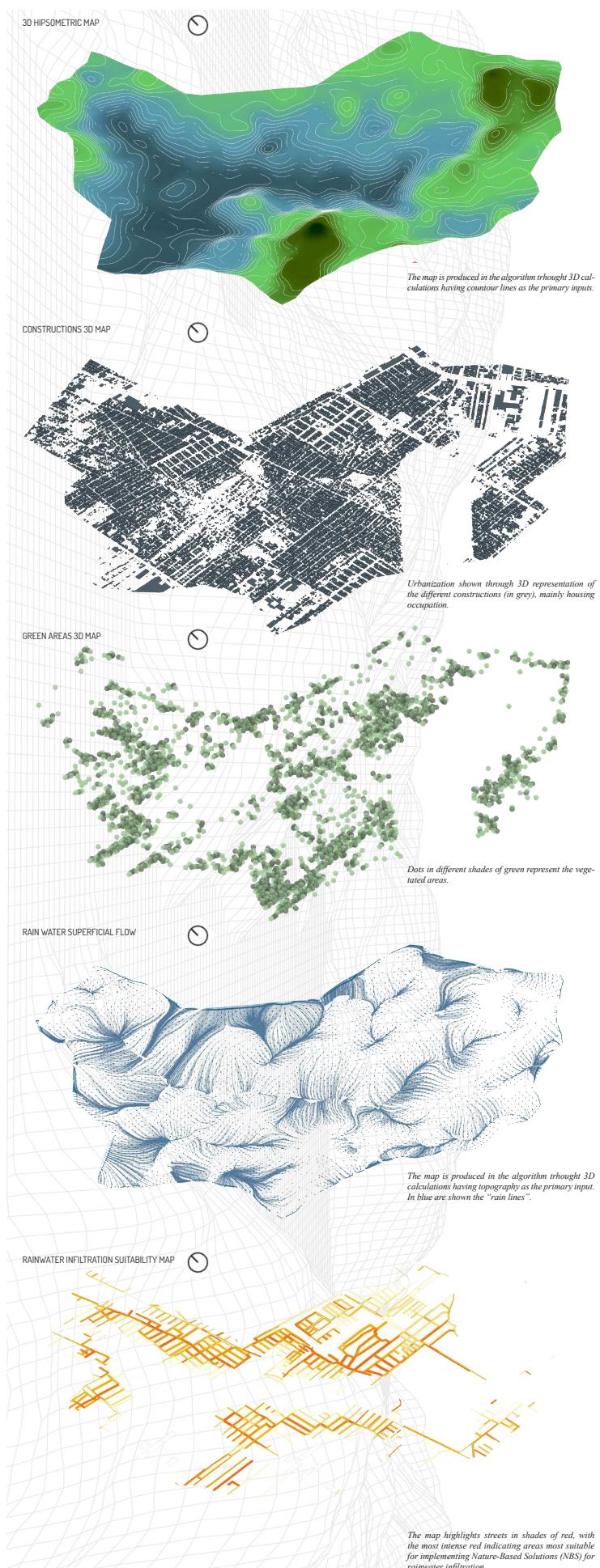
Depois, no que diz respeito à integração entre diferentes escalas de projeto da paisagem, a Modelagem da Informação (MI) requer estágios complementares de modelagem de acordo com o nível desejado de complexidade. Os programas de MI têm sido direcionados principalmente para o próprio edifício como objeto. No entanto, quando se trata de integração com a paisagem, pelo menos dois níveis diferentes de processo de planejamento e modelagem são necessários. Eles podem ser categorizados como escala cidade/vizinhança e escala edifício, exigindo uma interface entre procedimentos computacionais paralelos e programas diferentes, no qual, por sua vez, é o GIS uma aplicação típica para escalas maiores e programas BIM para o *design* de objetos (Jusuf *et al.*, 2017).

Essa operação complementar indica que, em relação à abordagem imperativa de múltiplas escalas, as demandas de planejamento e *design* da paisagem ainda não são adequadamente atendidas por um único programa ou processo. A complementação é indispensável ao lidar com múltiplas escalas e paisagens altamente complexas e multiescalares do ponto de vista da modelagem (Lange, 2001). Uma operação em dois níveis é o requisito mínimo para aplicar a MI à paisagem.

Assim, é possível assumir que modelar manualmente o ambiente virtual, que é a abordagem CAD tradicional, não é a mais adequada para a paisagem, e uma abordagem baseada em GIS deve ser aliada à uma abordagem baseada em 3D para objetos da paisagem. Além disso, a integração entre o planejamento e *design* da paisagem ou entre diferentes escalas exige uma interface que pode não ser linear entre vários programas e/ou *plugins*.

<sup>1</sup> Modelagem paramétrica é um processo de design baseado em parâmetros ou variáveis que definem e manipulam elementos geométricos em um modelo. Esse método permite a criação de modelos flexíveis e adaptáveis, nos quais ajustes nos parâmetros automaticamente alteram o design, mantendo as relações entre os componentes (Er-Retby *et al.*, 2024; Abdollahzadeh *et al.*, 2022).

<sup>2</sup> Algoritmos baseados em inteligência artificial servem para identificar padrões e realizar previsões com base em grandes conjuntos de dados. Esses modelos empregam diferentes técnicas, como aprendizado supervisionado, não supervisionado ou por reforço, para extrair conhecimento a partir de dados históricos e aplicá-lo em contextos preditivos, classificatórios ou descritivos. As abordagens podem incluir redes neurais profundas, regressões avançadas, árvores de decisão ou métodos probabilísticos, permitindo aplicações no planejamento da paisagem (Passos, 2021).



**Figura 33.** Ilustração em 3D de diferentes dados georreferenciados gerados a partir de algoritmo. Fonte: João Pedro Deodato Barreto e autora, 2024.

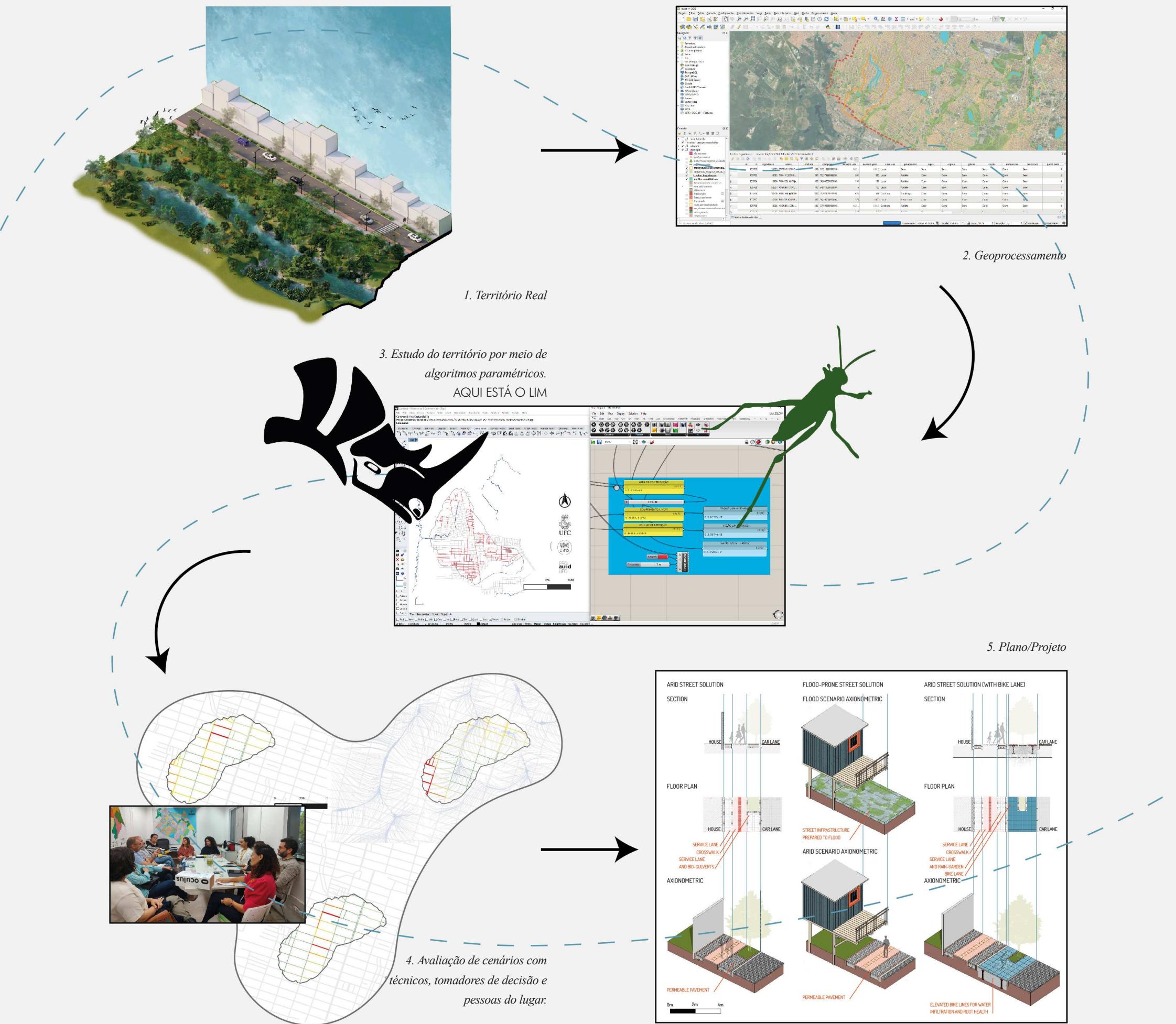
Em segundo lugar, a MI deve ser baseada em dados e utilizar informações em constante atualização, quando pertinente. As tecnologias atuais, como o uso de imagens de satélite atualizadas anualmente, ressaltam a importância de aproveitar esses recursos para a proposição de *designs* mais adequados e eficientes para a paisagem. Além disso, o uso desses dados antes, durante e após a criação do *design*, a partir de indicadores personalizados para cada situação, é fundamental. Isso é imprescindível para a elaboração de projetos mais resilientes que, como mencionado anteriormente, demandam adaptação constante, considerando, inclusive, as alterações exponenciais na paisagem decorrentes das mudanças climáticas. A parametrização e a inteligência artificial têm o potencial de se tornarem grandes aliadas em um planejamento da paisagem inteligente e reativo, em contraposição aos modelos tradicionais.

Em terceiro lugar, a MI incorpora processos dinâmicos para o *design* e permite a visualização de várias possibilidades antes de chegar ao resultado ideal. Essa dinâmica surge da modelagem paramétrica com base no princípio de que cada modelo é construído com entidades cujos atributos podem ser fixos ou variáveis. Atributos fixos são controlados e correspondem à forma, materiais, desempenho e custos (Eastman *et al.*, 2008), enquanto atributos ou parâmetros variáveis são as regras que definem o comportamento geométrico (linhas, superfícies, volumes e suas associações) e o comportamento não geométrico (materiais, quantitativos, desempenho etc.) dos atributos fixos, permitindo que objetos se ajustem automaticamente de acordo com as mudanças de controle e contexto. Como as paisagens são essencialmente dinâmicas e estão sob múltiplas interações com a sociedade e o ambiente, ainda existem relações expressivas que não podem ser representadas graficamente ou quantificadas. Portanto, modelos digitais de paisagem, seja para inferência visual, simulação e compreensão do comportamento ou outros aspectos invisíveis da paisagem, requerem abstrações e simplificações (Ervin, 2001).

Por fim, considerando a essência em constante mudança da paisagem, a modelagem paramétrica e a inteligência artificial são ferramentas promissoras não apenas para incorporar dinamismo aos processos de planejamento e *design* da paisagem, mas também para alcançar modelos dinâmicos em que as interações entre paisagem, sociedade e ambiente podem ser representadas com mais precisão por meio de funções e algoritmos.

Tais características não são originais, pois cada uma foi inferida de pesquisas e práticas anteriores. No entanto, reuni-las como um conjunto de estratégias integradas é pertinente para a aplicação do LIM em um estudo de caso e para reflexões visando replicá-las em outras situações. Para alcançar um dos objetivos deste trabalho, elas visam reforçar que a computação oferece mais oportunidades e novos modos de pensar para expandir as ferramentas de *design*, fluxos de trabalho e metodologias de planejamento e *design* da paisagem.

Em acordo com Cantrell *et al.* (2017), as soluções para as demandas e desafios futuros da paisagem devem deixar para trás as profissões atuais encantadas com a representação do *design* e da estética e, em vez disso, aproveitar o potencial e a natureza colaborativa do *design* com uma conexão entre as realidades virtuais e físicas. O LIM, portanto, é uma oportunidade de visualização, mas não restrita a ela, pois



**Figura 34.** Ilustração do processo de planejamento e decisão com o uso do LIM. De cima para baixo: território, dados georreferenciados, algoritmo, cenários possíveis para discussão, cenário escolhido. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

incorpora informações à modelagem, as quais se referem a processos naturais e implicam uma abordagem abrangente visando atingir o equilíbrio entre as estruturas dos sistemas artificial e natural que nos sustentam. A compreensão leva a uma maior autonomia desses processos nos planos e *designs* de paisagem e atende aos conceitos de Soluções Baseadas na Natureza e Infraestrutura Azul como linguagens e ferramentas que possibilitam viver sem esgotar a natureza.

Vale ressaltar aqui que o LIM nessa pesquisa é entendido como uma **ferramenta** que tem um grande potencial de melhorar a eficácia de projetos da paisagem e estudos paisagísticos. Contudo, a MI por si só não é uma **metodologia** de projeto, ela pode sim ser integrada, mas sozinha é apenas uma ferramenta, a Figura 34 ilustra essa relação. Como um campo promissor para a aplicação do LIM, as SBN encontram circunstâncias favoráveis na tecnologia da computação para aprimorar a paisagem urbana. Esta interação será trabalhada no próximo tópico.

#### 4.2.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Esta dissertação foca na Infraestrutura Azul e nas soluções baseadas na natureza como procedimentos-chave para a exploração do LIM e, respectivamente, como suporte físico e técnico para aprimorar os Serviços Ecossistêmicos nas cidades.

O gerenciamento de enchentes em áreas urbanas foi selecionado como uma avaliação piloto porque a água nas cidades é um problema-chave. Em relação ao contexto atual de crescente urbanização e mudança climática, Cutter *et al.* (2018) destacam que um dos impactos mais prevalecentes é o das enchentes, as quais tendem a ocorrer em cidades que anteriormente eram relativamente consideradas seguras. Além disso, as enchentes demandam soluções de gerenciamento que vão desde volumes excepcionalmente grandes até pouco acima do fluxo base. Portanto, a abordagem ideal deve ser capaz de se adaptar a esses pulsos de água da chuva e operar de maneira adaptativa. As SBN oferecem essa vantagem, ao contrário das técnicas tradicionais, que são dimensionadas para capacidade máxima e subutilizadas na maior parte do tempo.

Por fim, o controle de enchentes tem se concentrado na infraestrutura tradicional ou cinza, com bons resultados na redução de riscos. No entanto, entende-se que essa abordagem oferece baixa sustentabilidade (Vojinovic, 2015), enquanto a IeA proporciona um conceito multifuncional que pode reduzir a vulnerabilidade e aumentar a resiliência. Portanto, a aplicação do LIM para examinar alternativas para soluções tradicionais, considerando não apenas sua eficácia, mas também sua adaptação às necessidades atuais e sua sustentabilidade a longo prazo, representa um importante desafio para a pesquisa e formulação de políticas públicas.

Na tomada de decisões, uma avaliação adequada da Infraestrutura Azul deve fornecer um exame equivalente, seja apontando para uma solução totalmente azul, verde, cinza ou híbrida. Uma abordagem metodológica precisa ser estabelecida sob a perspectiva da multifuncionalidade e o LIM é uma ferramenta promissora. Esta ferramenta é proposta no Capítulo 5.



**Figura 35.** Imagens ilustrativas da intervenção proposta para a cidade de Belém do Pará. As transformações com IeA no passar do tempo de cima para baixo. Fonte: Elaborada por João Pedro Deodato, 2023.

# CAPÍTULO 5

# O ALGORITMO

# TUCUNARÉ

## Tópico 5.1

### O ARTEFATO

Conforme mencionado anteriormente, é necessário primeiro definir o problema a ser abordado ao lidar com o LIM, devido à falta de um programa estabelecido capaz de lidar com diferentes escalas e problemas. Em seguida, escolhem-se os programas apropriados com um objetivo específico em mente.

O algoritmo abordado neste texto está em andamento desde 2018, indicando que o artefato em questão já foi adaptado para várias situações e foi especificado e aprofundado para lidar com diferentes questões específicas para além dos estudos de caso aqui abordados.

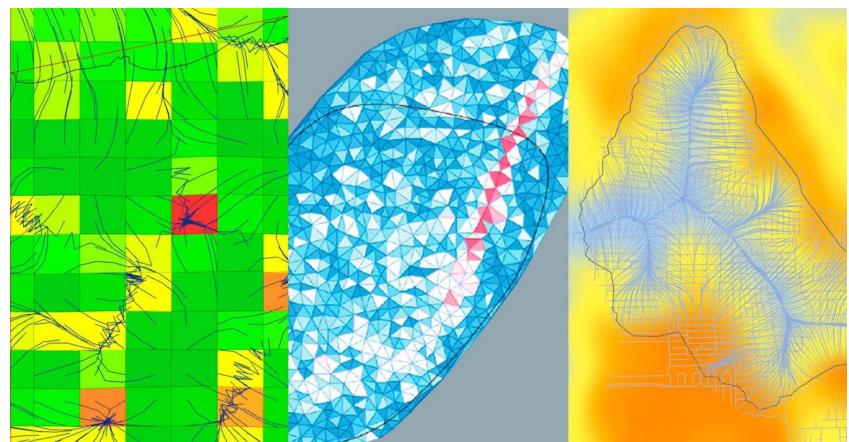
Neste capítulo, será tratado inicialmente o *design* do algoritmo em si, por meio do primeiro estudo de caso realizado, na Bacia do Mata-Fome, em Belém do Pará. O algoritmo, que iremos referir holisticamente como “Tucunaré”<sup>1</sup>, foi desenvolvido com os seguintes objetivos em mente:

- 1. Analisar o comportamento pluviométrico:** Inicialmente, é essencial compreender o padrão e a intensidade das chuvas no território em estudo, utilizando como referência as curvas de nível.
- 2. Delimitar a microzona de atuação:** A partir do recorte estabelecido para o estudo, é necessário definir a área de intervenção, a microbacia. É possível identificar locais vulneráveis a alagamentos, bem como áreas com presença de corpos d’água naturais, como rios e lagoas.
- 3. Cálculo de vazão<sup>2</sup>:** Uma equação empírica é utilizada para calcular o escoamento superficial na área de impacto, determinando a demanda de absorção pela Infraestrutura Azul.
- 4. Selecionar os locais estratégicos para Infraestruturas Azuis:** Com base na análise prévia, são identificados os melhores pontos ao longo do sistema viário para implantar Infraestruturas Azuis, como jardins de chuva, bacias de retenção e biovaletas.
- 5. Avaliar o impacto das intervenções:** Por fim, é fundamental dimensionar o impacto das infraestruturas propostas, considerando aspectos como capacidade de absorção, custo financeiro, efeitos na qualidade da água e influência na microbacia em questão.

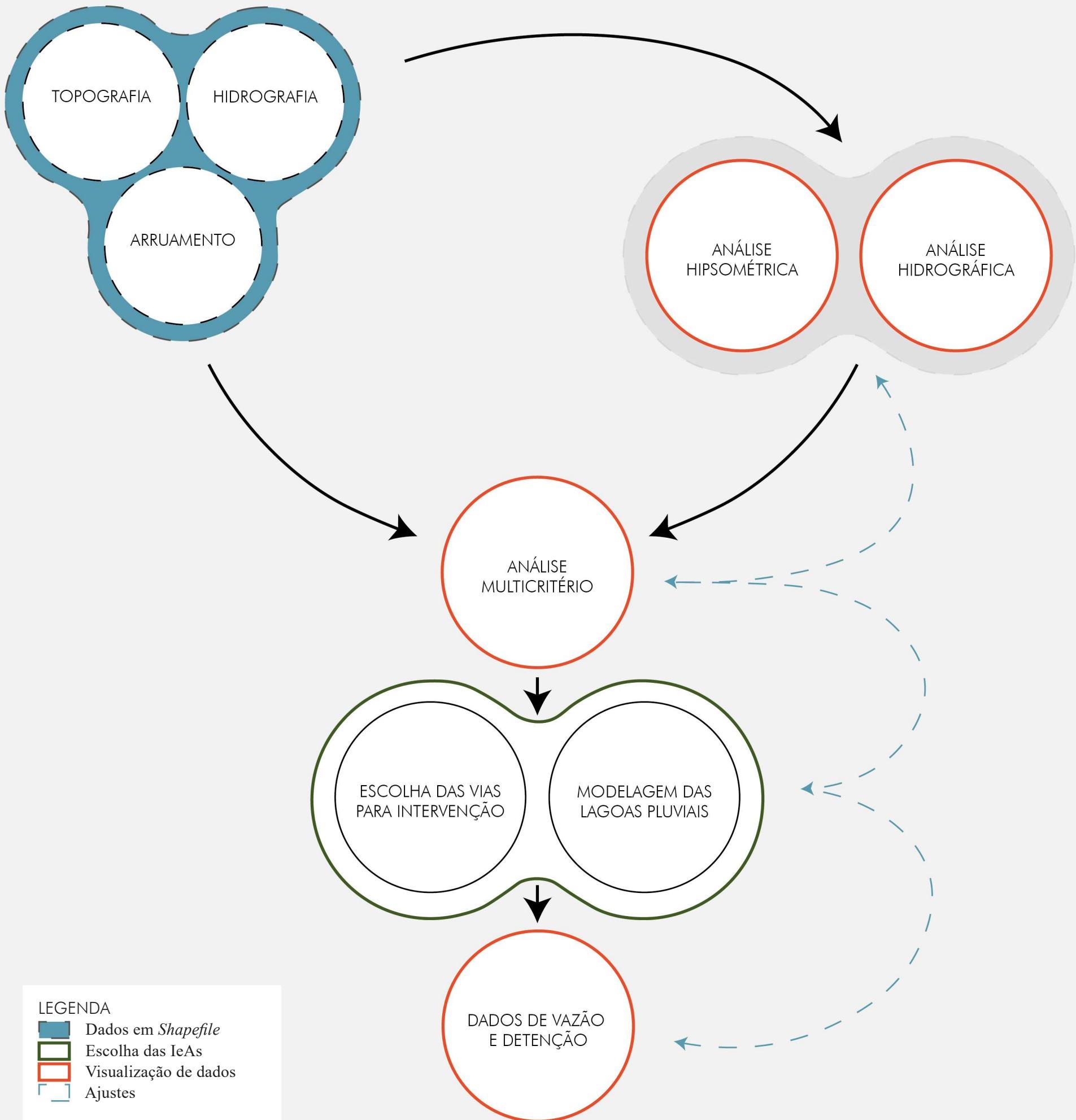
Cada um desses objetivos foi desdobrado em etapas ao longo do desenvolvimento do algoritmo (Figura 37). Com o passar do tempo, essas etapas foram aprimoradas e refinadas para uma finalização mais precisa e próxima da realidade. Na Figura 36, é possível observar o resultado produzido pelo algoritmo em relação às áreas com maior propensão a alagamentos em uma determinada região nos anos de 2018, 2020 e 2023 (da esquerda para a direita).

<sup>1</sup> O “tucunaré”, escolhido como nome para o artefato elaborado, é um peixe de água doce encontrado principalmente na bacia amazônica e em outros rios da América do Sul, como o Orinoco e o rio Paraná. Ele pertence à família dos Cichlidae e é conhecido por sua beleza e força durante a pesca esportiva. Além disso, o tucunaré é considerado uma espécie importante na cadeia alimentar dos ecossistemas aquáticos em que habita, contribuindo para o equilíbrio ecológico desses ambientes

<sup>2</sup> **Vazão:** “Quantidade de água que passa por uma dada seção em um canal de drenagem num período de tempo.” (ITP, 2007, p. 92).



**Figura 36.** Resultado produzido pelo algoritmo em relação às áreas com maior propensão a alagamentos em uma determinada região nos anos de 2018, 2020 e 2023 (da esquerda para a direita). Fonte: Elaborada pela autora, 2024.



**Figura 37.** Ilustração das diferentes etapas do algoritmo Tucunaré. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

O fato de ter sido desenvolvido em uma plataforma de modelagem paramétrica possibilitou que o Tucunaré fosse reutilizado em diversos estudos e pesquisas. Além disso, com a contribuição de outros pesquisadores por meio de opiniões e direcionamentos, ele pôde evoluir ao longo do tempo. Apesar de possuir uma estrutura linear, a modelagem paramétrica, em conjunto com a modelagem 3D, permite a alteração de parâmetros em toda a sua estrutura em tempo real, o que possibilita a geração rápida e eficiente de diferentes cenários para cada situação. Após um maior detalhamento dos *softwares* utilizados, cada etapa do algoritmo será detalhada com maior precisão.

### 5.1.1 O CASO BACIA DO MATA-FOME

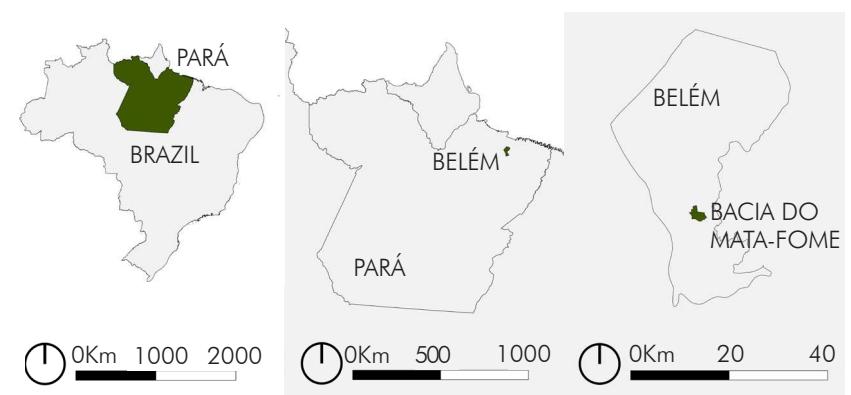
O território escolhido para o caso de estudo foi a Bacia do Mata-Fome (Figura 38), o território da Bacia é típico da área de expansão da periferia metropolitana (RMB) de Belém do Pará — inclusive, o nome da bacia remete às primeiras ocupações ribeirinhas que utilizavam as águas como fonte de alimento (Silva & Luz, 2016). Anterior ao processo de ocupação, a área era contornada por uma floresta, que foi sendo reduzida conforme o avanço do processo de urbanização da região.

Encontrou-se no estudo de caso uma oportunidade por se tratar de uma área alagável que está atualmente densamente ocupada, ocasionando conflitos internos na região, além de ser um território que sofrerá os impactos das mudanças climáticas nos próximos anos por estar sujeito às alterações de nível da maré. Este estudo de caso teve início no final de 2022 por meio de uma colaboração com a Universidade Federal do Pará, em conjunto com o grupo de estudos liderado pela professora Ana Cláudia Cardoso.

A aplicação do Tucunaré, combinada com os conhecimentos e experiência dos pesquisadores locais, impulsionou a expansão desta pesquisa para outras esferas, culminando em uma apresentação à Prefeitura da cidade de Belém. Posteriormente, a área foi incluída na submissão para o Projeto Cidade Presente, — um edital nacional de 2023, que será abordado no próximo Capítulo — no qual Belém foi aprovada para a primeira etapa. No entanto, não houve participação da autora de forma direta na submissão.

### 5.1.2 PROGRAMAS E INPUTS

A fim de trabalhar a modelagem paramétrica aliada à visualização tridimensional, o uso do Grasshopper, um modelador algorítmico acessível a não programadores, é ideal para o trabalho. O Grasshopper é um *plugin* para o Rhinoceros (Figura 40), um *software* principal amplamente utilizado como modelador tridimensional. O Rhinoceros oferece uma gama enorme de possibilidades, permitindo trabalhar com elementos de diversos tipos e escalas. Ele possui uma interface intuitiva e flexível, sendo utilizado em uma variedade de campos, desde arquitetura e *design* industrial até engenharia e animação. O Grasshopper, por sua vez, permite aos usuários criar modelos paramétricos complexos sem a necessidade de programação tradicional, utilizando uma abordagem baseada em algoritmos visuais. Isso torna a criação e modificação de modelos mais rápida, flexível e acessível para uma ampla gama de profissionais, incluindo *designers*, arquitetos e engenheiros. Cabe também destacar a grande interoperabilidade que este combo possui com diferentes tipos de arquivos de base tridimensional e informacional, tanto para importação quanto para exportação.



**Figura 38.** Mapas da localização da Bacia do Mata-Fome. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

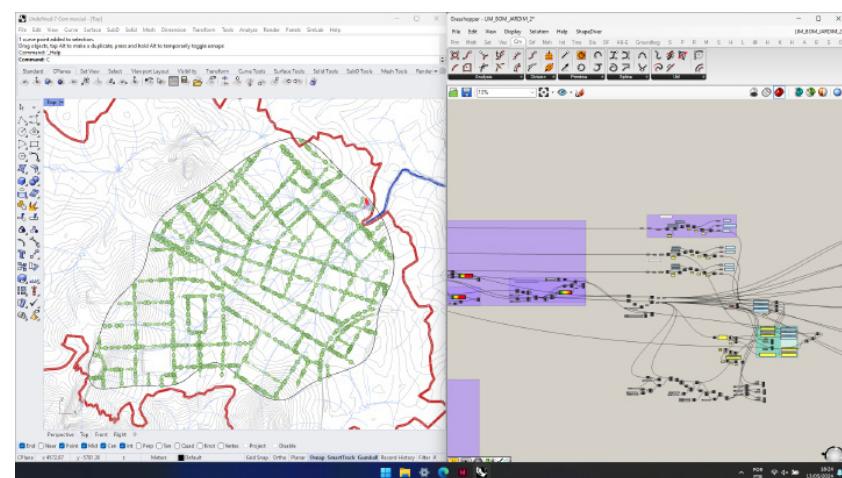


**Figura 39.** Imagens de satélite ilustrando o adensamento da Bacia do Mata-Fome entre 2009 e 2023. Fonte: Google Earth, 2023.

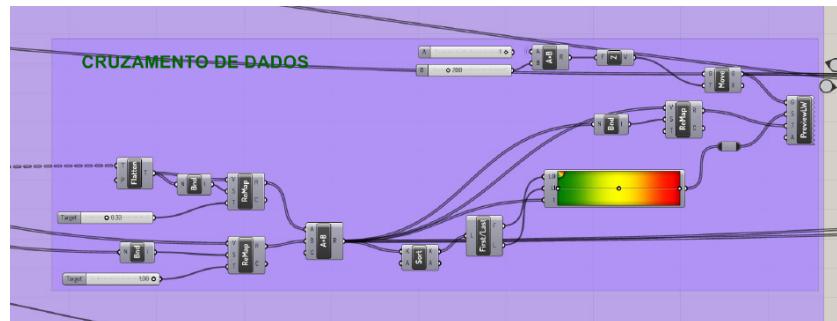
Para o projeto Tucunaré, essa interoperabilidade é imperativa, pois os dados das cidades podem ter diferentes formatos, como .dwg, .dxf, .shp, .kmz, .xlsx, entre outros<sup>3</sup>. No algoritmo optou-se por trabalhar com arquivos do tipo *shape*, comumente usados em geoprocessamento, pois esses arquivos contêm dados vetoriais ou rasterizados vinculados a um banco de dados para seus objetos. Isso é eficiente, pois, com um único arquivo, é possível ter informações, por exemplo, sobre as entidades que compõem as vias de uma cidade, como linhas ou polilinhas, juntamente com sua largura, nome, classificação, entre outros atributos. Contudo, quando necessário, é possível inserir outros tipos de arquivo. Essa abordagem simplifica a manipulação e análise dos dados urbanos, facilitando a integração com os modelos criados no Grasshopper e no Rhinoceros.

É importante ressaltar que ao longo de todo o processo, mapas podem ser gerados em tempo real, como será possível observar através das imagens atreladas. Devido ao fato de ser um processo baseado em modelagem algorítmica combinada com modelagem 3D e destinado principalmente a projetistas, uma das principais saídas são as imagens, produzidas ao longo de todo o processo por meio da exportação da área de trabalho do programa Rhinoceros. Para complementar os mapas, foram incluídos setores no algoritmo especificamente para desenhar elementos cartográficos, como escala gráfica, norte e legendas automatizadas de acordo com as informações apresentadas. Além disso, é possível exportar a modelagem ao longo de todo o projeto no formato *shapefile* para a criação de mapas que possam ser integrados a outros conjuntos de dados em bancos de dados maiores, possibilitando análises mais abrangentes através do geoprocessamento.

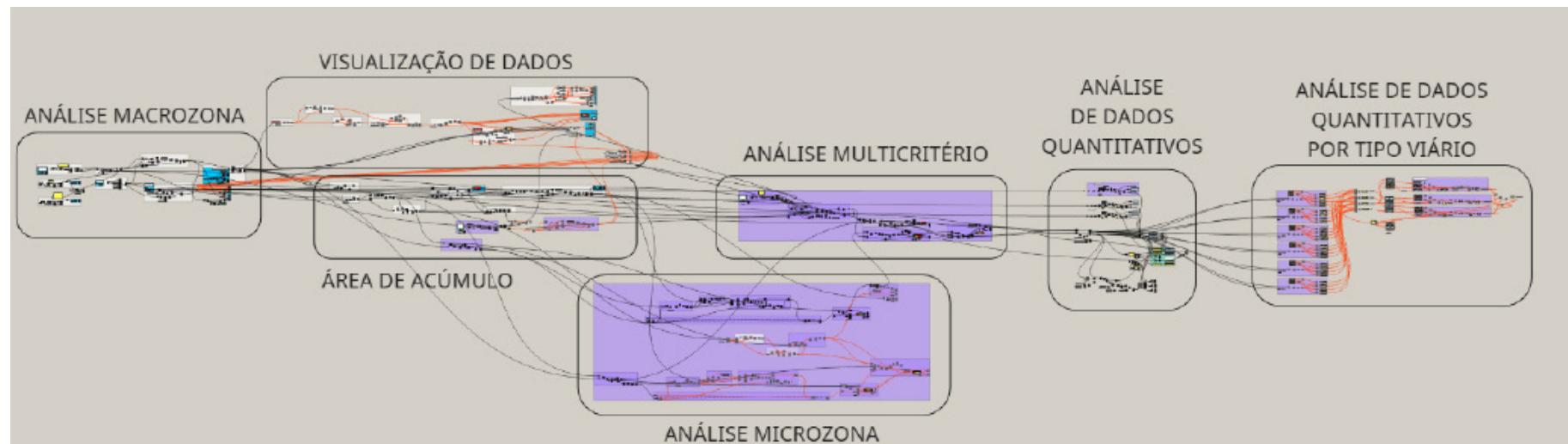
Uma limitação dos softwares é sua capacidade reduzida em lidar com a alta complexidade de dados presentes em arquivos *shape*. Por



**Figura 40.** Área de trabalho do Tucunaré. À esquerda, o programa Rhinoceros, onde os dados são visualizados. À direita, o programa Grasshopper, onde o algoritmo é manuseado e construído. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.



**Figura 41.** Pequeno agrupamento do algoritmo. Pilhas do algoritmo conectadas da esquerda para a direita. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.



**Figura 42.** Algoritmo completo e suas diferentes etapas, divididas em setores. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

3 Os diferentes tipos de arquivos mencionados têm finalidades distintas: .dwg é usado para design e engenharia, .dxf para interoperabilidade em CAD, .shp para dados geoespaciais, .kmz para dados do Google Earth e .xlsx para planilhas do Excel. No projeto Tucunaré, o formato .shp é preferido devido à sua capacidade de armazenar dados geoespaciais vetoriais com atributos, facilitando a análise urbana.

exemplo, um arquivo *shape* contendo os lotes de uma cidade inteira pode ter mais de um milhão de lotes, cada um com informações detalhadas. Esse volume de dados pode sobrecarregar o algoritmo, resultando em desempenho lento ou até mesmo inviabilizando sua utilização, dependendo do *hardware* disponível. Para contornar essa situação, muitas vezes é necessário realizar uma limpeza nos arquivos, removendo informações desnecessárias, ou até mesmo recortar a área de interesse do arquivo *shape* completo antes de incorporá-lo ao processo de modelagem. Essas práticas visam reduzir a carga de dados e melhorar o desempenho do algoritmo.

O Tucunaré, por ser um algoritmo composto por várias fases, demanda um conhecimento técnico profundo tanto do *software* quanto das temáticas que ele analisa (Figura 42). Uma simplificação de suas tarefas seria necessária para um uso em larga escala<sup>4</sup>, porém isso poderia limitar sua eficácia em diferentes casos, o que é crucial para projetos dessa natureza. Assim, equilibrar a complexidade técnica com a aplicabilidade prática é um desafio importante a ser considerado na sua utilização. A seguir, as diferentes etapas do algoritmo são descritas.

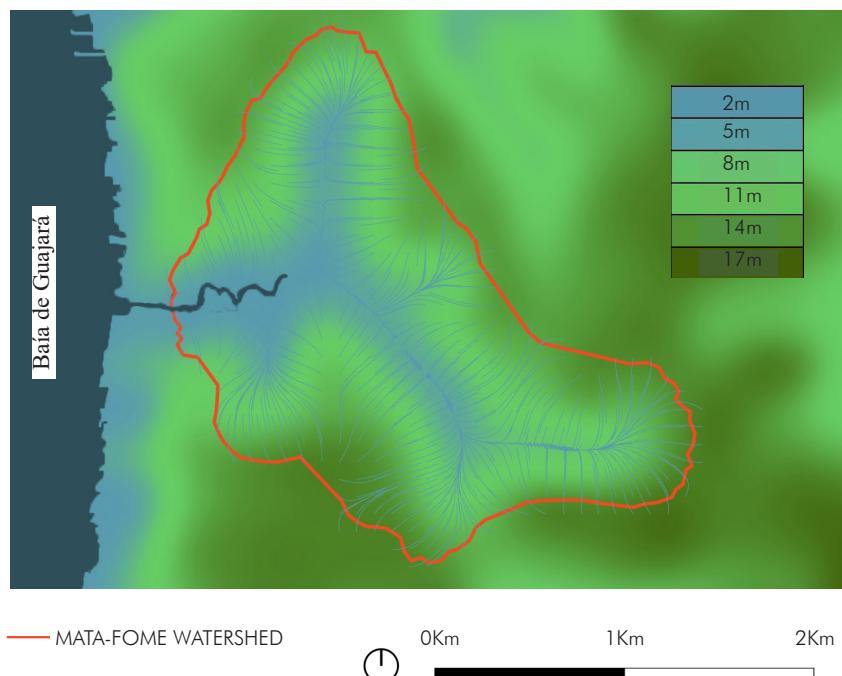
### 5.1.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO PLUVIOMÉTRICO

O artefato inicia seu processo com a simulação pluvial da macrozona de análise, para a qual é necessário delimitar o trecho a ser estudado. A partir disso, é possível simular uma área mais ampla ao redor desse trecho, permitindo a observação da microzona de atuação. Nesta etapa inicial, os *shapes* das curvas de nível são inseridos no algoritmo (Figura 44) e suas alturas são ajustadas de acordo com dados da realidade, provenientes da tabela de atributos dos elementos 3D, para criar uma superfície topográfica precisa.

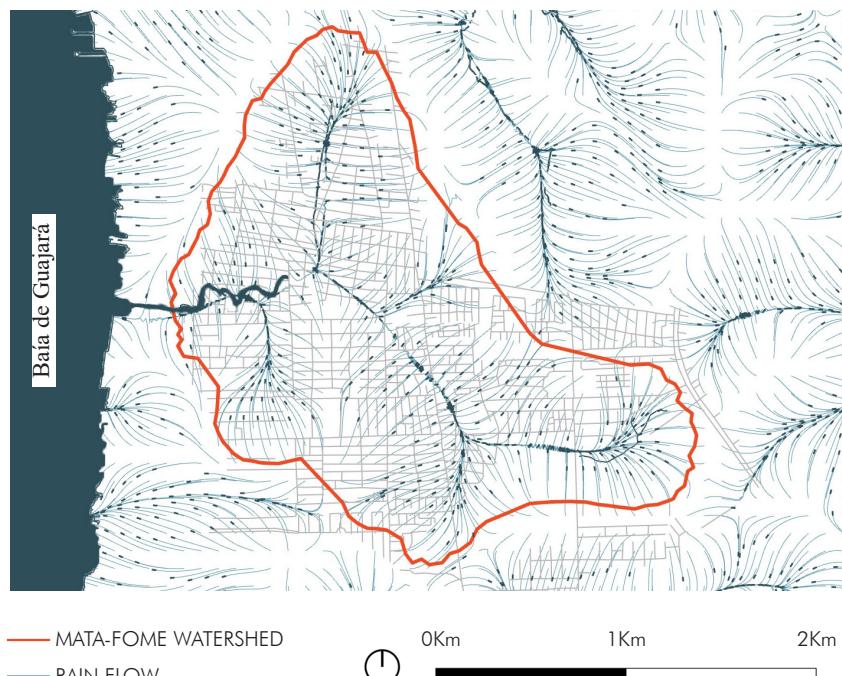
Posteriormente, a simulação pluvial ocorre de forma geométrica, utilizando o comportamento de partículas que seguem regras estabelecidas no algoritmo (Figura 43). No caso em questão, as partículas se movem sempre em direção ao ponto mais baixo da superfície topográfica. Durante esse processo, há possibilidade de realizar ajustes refinados na modelagem, os quais são determinados pelo usuário. É essencial buscar um equilíbrio entre um refinamento suficiente para representar como desejado o fenômeno estudado e evitar um refinamento excessivo que possa retardar o processo de simulação.

A necessidade de uma etapa para a macrozona decorre da complexidade da influência territorial de um trecho inicialmente delimitado. Nos casos de estudo, esses trechos correspondem a áreas alagáveis ou recursos hídricos, nos quais a chuva que incide sobre eles se estende por uma área maior do que o próprio trecho. Por isso, pode ser necessário ajustar esse recorte algumas vezes para alcançar a extensão ideal da área de estudo. Além disso, é importante manter uma “zona de erro” ao redor do recorte inicial, a qual deve ser desconsiderada da análise. Nas bordas do recorte, o processamento da superfície baseado nas curvas de nível não possui pontos de ancoragem, o que pode resultar em erros de modelagem. Portanto, a inclusão de uma macrozona ajuda a mitigar esses erros, proporcionando uma representação mais precisa da realidade.

<sup>4</sup> No caso dos workshops desenvolvidos ao longo de 2023 e 2024 para profissionais e estudantes (ver tópico 6.1), por exemplo, foi utilizada uma versão simplificada do algoritmo. Além disso, os usuários possuíam um poder de decisão limitado aos inputs do artefato, não podendo editar suas regras.



**Figura 43.** Mapa Hipsométrico da Bacia do Mata-Fome. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.



**Figura 44.** Mapa do cimento pluvial na Bacia do Mata-Fome, microzona em vermelho. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

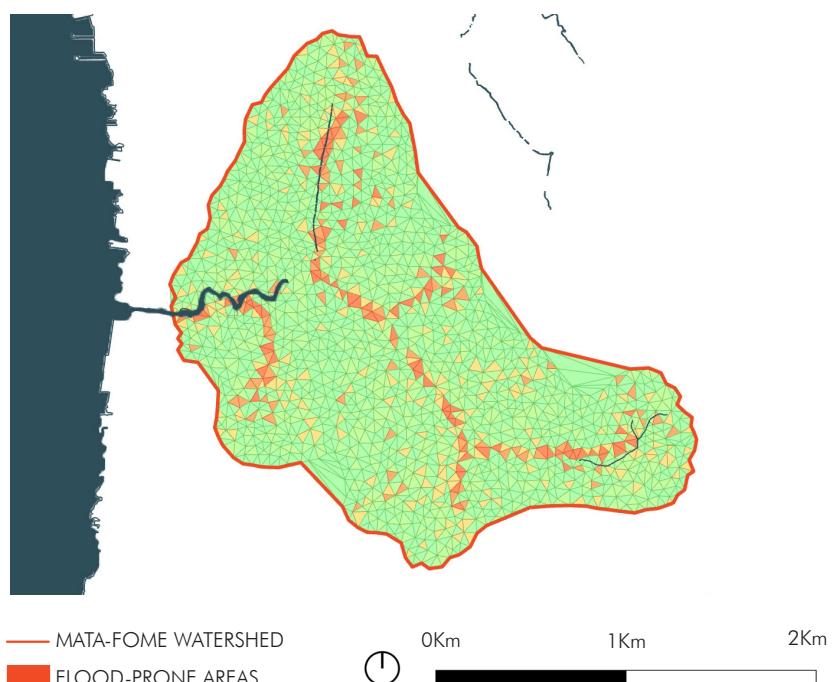
### 5.1.4 DELIMITAÇÃO DA MICROZONA DE ATUAÇÃO

A delimitação da microzona é realizada observando-se a simulação e desenhando manualmente a área de impacto pluvial a partir da região de estudo ou intervenção. Este desenho pode ser feito no software Rhinoceros, utilizando polilinhas para traçar as bordas da área desejada. Foi possível observar uma área pluvial de  $4,91 \times 10^6 \text{ m}^2$  para a Bacia do Mata-Fome.

Após a simulação pluviométrica geral, outras simulações específicas são realizadas apenas na microzona para a aquisição de dados como o trecho onde a água tende a se acumular e a distância percorrida até ele. O trecho é delimitado a partir das áreas em que há maior conflito entre as partículas e a superfície topográfica. Na primeira simulação, as polilinhas que ilustram o cimento pluvial possuem um número limitado de segmentos, todos com o mesmo tamanho. Já na segunda simulação, os segmentos continuam de forma indeterminada até chegar na zona de acúmulo, onde são interrompidos, gerando polilinhas que representam as chuvas de diferentes tamanhos.

### 5.1.5 CÁLCULO DE VAZÃO

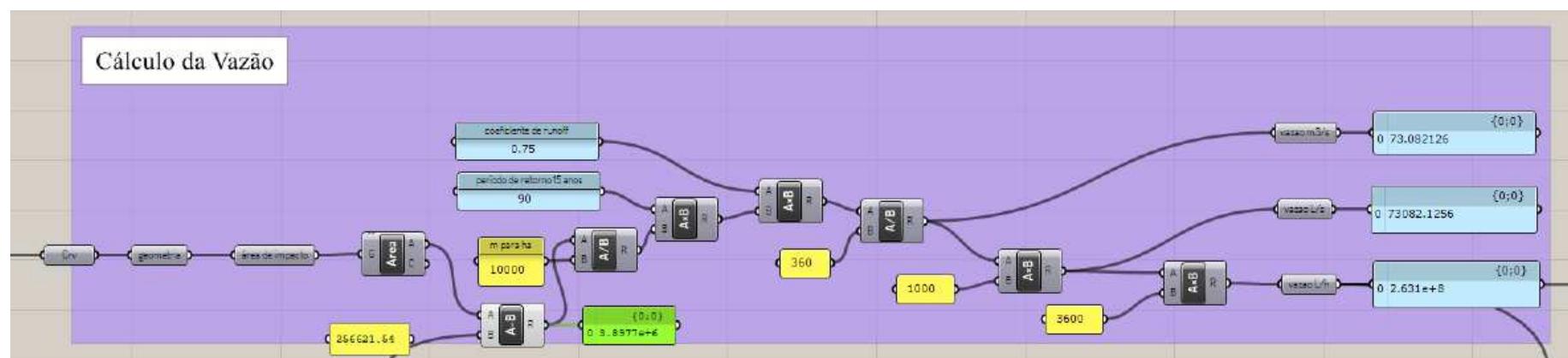
Em seguida, uma equação empírica é utilizada para calcular o escoamento superficial na área de impacto estudada (Figura 46), visando determinar o volume de demanda de reservação ou absorção desta água pelos equipamentos de Infraestrutura Azul e Cinza. O resultado é expresso em litros por hora (Silva *et al.*, 2013). O volume calculado, convertido em capacidade de absorção, é definido com base na importância da redundância, flexibilidade e robustez na concepção de uma infraestrutura mais resiliente.



**Figura 45.** Mapa da área de acúmulo pluvial em vermelho na Bacia do Mata-Fome. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

$$R = (A \times \alpha \times f) \div \Delta t$$

**Figura 46.** Equação de escoamento superficial. Fonte: Silva *et al.*, 2013.



**Figura 47.** Grupo de funções do algoritmo para o cálculo da vazão. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A área de impacto é obtida no algoritmo a partir do recorte da microzona de atuação (A). O coeficiente de runoff ( $\alpha$ ) é um parâmetro que é uma medida que representa a fração da precipitação que se transforma em escoamento superficial — neste trabalho, é definido como 0,7 (Jinno *et al.*, 2009). A taxa de escoamento ( $f$ ) é estabelecida para um período de retorno de 15 anos, representando uma probabilidade da ocorrência de 1 em 15 anos (ou seja, 6,66%) de uma precipitação igual ou superior a 180mm/h (para Belém, no caso) (Souza *et al.*, 2012). O resultado obtido é de  $6,19 \times 10^8 \text{ L/h}$ , este valor é usado como base para o cálculo de capacidade de absorção dos equipamentos de Infraestrutura

Azul. Isso permite calcular em uma situação extrema, facilitando uma intervenção mais resiliente. O  $\Delta t$  representa a duração da precipitação, definida, neste caso, em uma hora.

Essa relação entre Infraestruturas Azuis e tradicionais torna o território mais preparado para as chuvas e menos suscetível a problemas de saneamento. O objetivo é criar um cenário de intervenção que esteja mais preparado para o futuro, considerando o conteúdo do Capítulo 3, em vez de focar apenas nas questões atuais e aguardar problemas que possam afetar aqueles com menos recursos para lidar com eles.

#### 5.1.6 SELEÇÃO DOS LOCAIS ESTRATÉGICOS PARA IeA

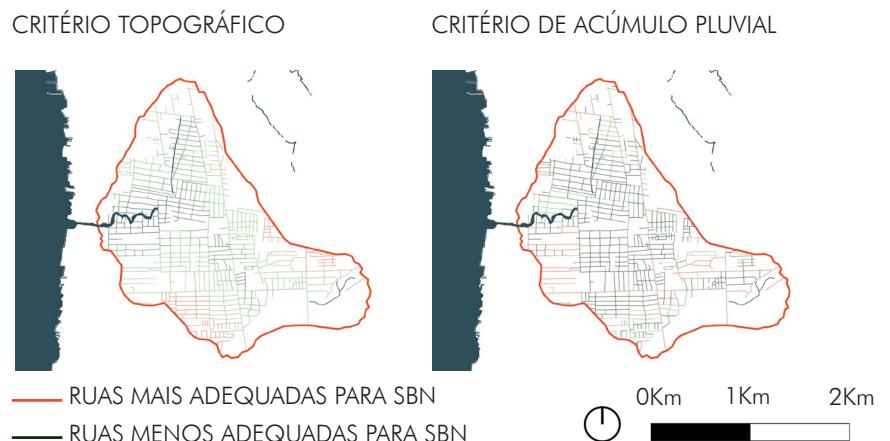
A partir deste ponto, o algoritmo deixa de ter apenas um caráter diagnóstico e passa a adquirir uma abordagem propositiva. Aqui, como modelo de intervenção para lidar com as questões estudadas, optou-se por propor inicialmente uma intervenção viária, utilizando a disposição das infraestruturas na via pública. Entende-se que a drenagem é primariamente uma responsabilidade pública, portanto, pensar nela de forma sistêmica e utilizar a malha viária para esse fim representa uma oportunidade.

Além disso, as diretrizes nacionais favorecem o transporte não-motorizado e público em detrimento do transporte privado e motorizado, abrindo espaço para futuras intervenções que reduzam as faixas destinadas ao transporte particular e invistam em alternativas como bicicletas e aumento no passeio de pedestres. Estes modos de transporte requerem ruas mais amigáveis e seguras, benefícios que podem ser proporcionados pelo conceito de soluções baseadas na natureza.

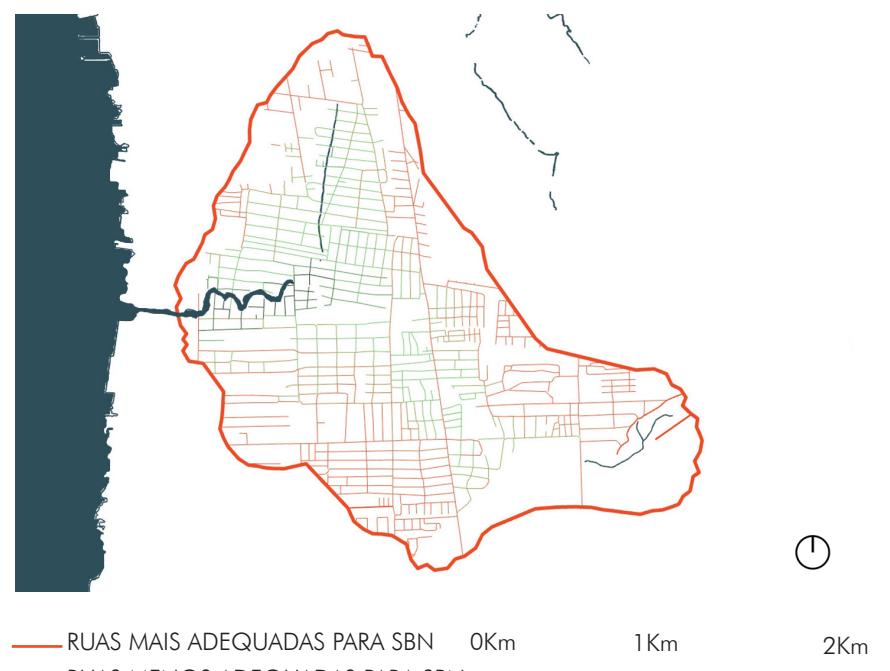
O algoritmo concentra-se inicialmente na instalação de jardins de chuva ou biovaletas ao longo da via, porém, pode adaptar-se para a disposição de reservatórios enterrados, pavimento drenante no passeio ou caixa viária, entre outras soluções. Isso permite propor uma rede de infraestruturas multifuncionais que se enquadram no conceito de soluções baseadas na natureza. Essa rede oferece benefícios climáticos, contribuindo para amenizar o microclima, criar corredores verdes para a fauna e flora local e reduzir a poluição do ar. No entanto, no estudo em questão, o foco está no papel dessas infraestruturas como áreas filtrantes para mitigar as enchentes urbanas. Portanto, é nesse aspecto que o algoritmo também se concentra.

Sendo assim, o *input* de vias passa a desempenhar um papel ativo no algoritmo, em contraste com seu papel anterior, meramente visual. É realizado um cruzamento entre a disposição das vias e a simulação pluviométrica, gerando mapas visuais que caracterizam as ruas onde a instalação das Infraestruturas Azuis é mais recomendada. Esse processo é baseado em dois parâmetros principais: as zonas antes da área de acumulação, em que há maior tendência de acúmulo de água e formação de poças ou córregos, e as zonas de cotas mais elevadas, em que a água da chuva pode ser retida no início do seu percurso, reduzindo sua velocidade.

Neste estágio, é viável definir as ruas para implantação das infraestruturas, seja por meio do algoritmo ou manualmente. Automaticamente, o algoritmo ajusta o peso dos fatores mencionados e seleciona as ruas de acordo com a intervenção planejada, como a extensão da reforma. Manualmente, também é possível escolher as ruas e incluí-las na intervenção. Esta opção manual é importante, pois muitas vezes a escolha depende de diversos fatores políticos, econômicos e sociais que o algoritmo não pode considerar.



**Figura 48.** Mapas de prioridade de ação com base nos diferentes critérios de análise. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.



**Figura 49.** Mapa de prioridade de atuação multicritério. Ruas vermelhas possuem maior prioridade segundo o parâmetro híbrido. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

### 5.1.7 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA INTERVENÇÃO

Diante do estudo apresentado, uma série de vias foram escolhidas para a intervenção, devido à sua distribuição ao longo da área de impacto pluvial, tornando-as ideais para a implantação de biovaletas (Figura 50). Atualmente estas vias são bastante áridas e contam com calçadas de largura mínima, em comparação com a largura das faixas de rolamento destinadas aos veículos.

Finalmente, é quantificado o impacto da intervenção, estimado aqui pelo volume total reservado pelas infraestruturas em cada segmento. Para isso, emprega-se uma estrutura subterrânea da biovaleta, composta por vegetação, substrato, areia grossa, manta asfáltica, brita graduada simples e brita 3. A capacidade de absorção de cada camada é considerada no cálculo, destacando-se a camada de brita 3 como a mais influente na absorção total, devido ao vazio entre as pedras, o qual retém água (30%). A profundidade de cada camada é determinada pelo usuário.

Quanto à localização e largura dos jardins ao longo da via, esses aspectos devem ser avaliados individualmente. De maneira simplificada, em um estudo mais amplo, o algoritmo presume que o jardim de chuva se estenda ao longo de toda a via, com a largura definida pelo usuário ou pelas características da área obtidas de dados de entrada. Diferenças de largura podem ser implementadas de acordo com o tipo de via e sua largura existente, mas tais informações devem estar presentes no arquivo *shape* utilizado como entrada ou serem fornecidas pelo usuário e inseridas no algoritmo manualmente.

Neste ponto, é possível incorporar uma série de regras para calcular diferentes tipos de impacto. Já estão definidos o volume desejado para uma chuva de 15 anos, para ser comparado com a capacidade de retenção das infraestruturas. Também podem ser incluídas chuvas para outros períodos de retorno, como 50 e 20 anos, para comparação. Além disso, se o usuário tiver dados sobre o custo médio de reforma viária, é possível adicionar estimativas de custo e consumo de materiais. Como o sistema é paramétrico, há poucas limitações para as informações que podem ser produzidas, desde que se tenham os *inputs* necessários.

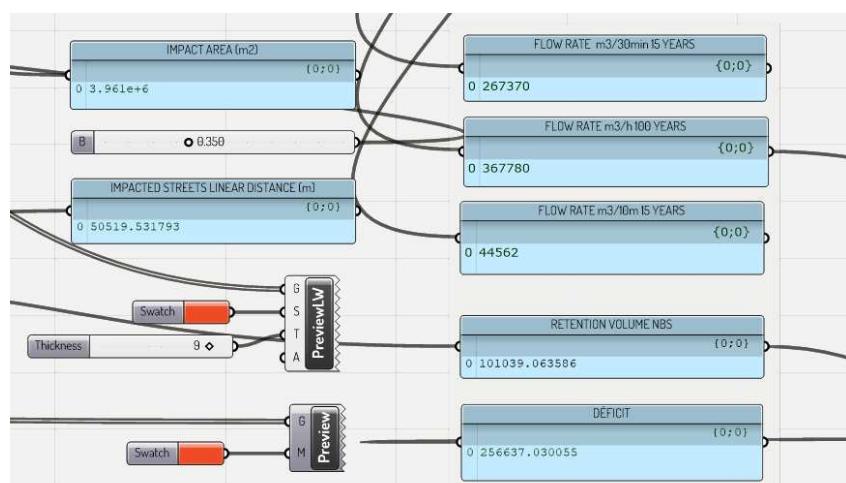
## Tópico 5.2 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

No caso apresentado, foi possível alcançar um volume de retenção de 101.039m<sup>3</sup>, o que garante uma segurança maior nos primeiros momentos de chuva, mas não assegura a drenagem da região como um todo, evidenciando a necessidade de uma solução híbrida: Cinza e Azul. Concluindo, o tópico anterior delineia o cerne do Tucunaré, que aspira ser uma ferramenta adaptável e específica, proporcionando soluções baseadas na natureza de forma contextualizada para cada localidade. Ele não se limita a regras estáticas, mas busca se adaptar a cada situação em que é implementado, como será evidenciado nos estudos de caso a seguir.

É crucial destacar que o algoritmo não visa fornecer um “projeto pronto” aos projetistas, mas sim orientar tecnicamente e de maneira abrangente sobre aspectos como a influência da localização e tamanho

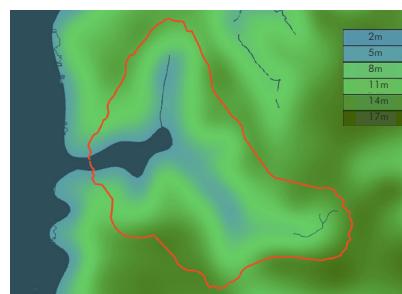


**Figura 50.** Mapa com ruas escolhidas para intervenção em Belém do Pará. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.



**Figura 51.** Resultados quantitativos no ambiente do Grasshopper. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

MAIOR CHEIA PREVISTA EM 2023



PREVISÃO COM AUMENTO DE 1,5°C DE TEMPERATURA MÉDIA



**Figura 52.** Mapas do comportamento da cheia na Bacia do Mata-Fome. Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

dos equipamentos no resultado da intervenção, além de permitir a criação eficiente de diferentes cenários. Esses são elementos que podem passar despercebidos em projetos urbanos tradicionais que apenas implementam soluções consideradas “resilientes” e “sustentáveis”, resultando em saídas enganosas e intervenções dispendiosas e ineficazes, sendo este tema aprofundado apenas no próximo tópico, relacionado aos próximos estudos de caso.

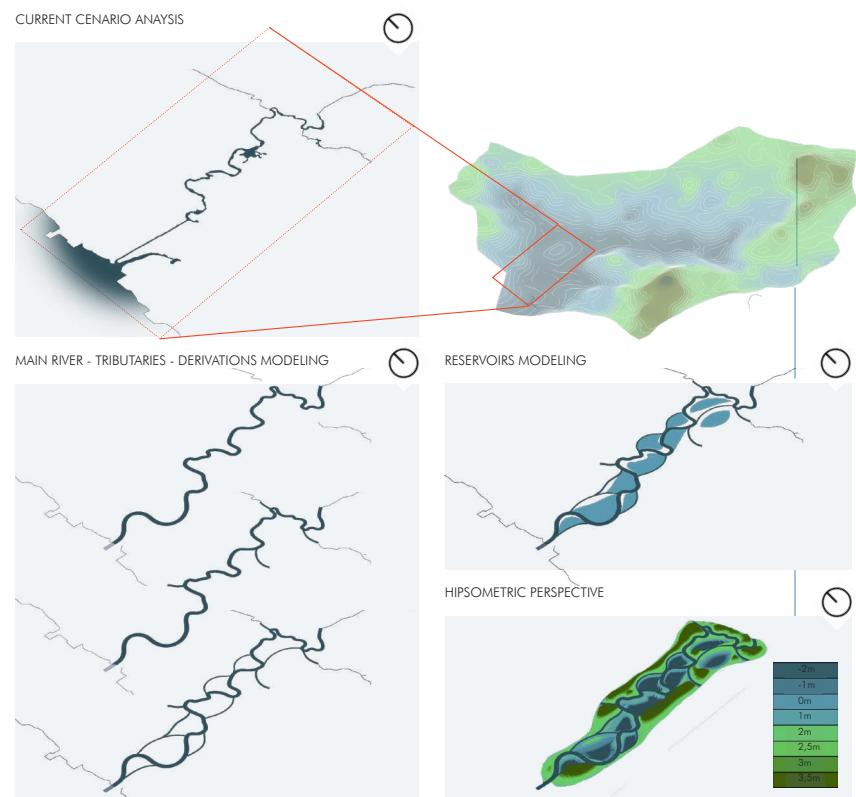
No caso de Belém do Pará, para além do uso do Tucunaré, também foi implantado um segundo algoritmo, que não é foco dessa dissertação, em que foi proposto um sistema de alagados naturais para dar suporte às outras infraestruturas propostas. De forma resumida, nas imagens ao lado é possível ver que a cheia do rio Guamá prevê uma subida na maré de até 3,6m (Marinha do Brasil, 2023), o que, com as previsões do aumento da temperatura global de 1,5°C, deve chegar a níveis mais alarmantes nos próximos anos (Climate Central, 2022). Sendo assim, foi proposto pela equipe de trabalho envolvida nesse projeto a criação de um parque alagado que pudesse dar suporte às outras infraestruturas nesse tipo de situação, como alternativa ao uso de comportas manuais (G1, 2013).

Diante do panorama apresentado no caso de Belém do Pará, posteriormente, foi proposta pela autora uma solução que considera a convivência harmônica com os eventos de alagamento, característica comum da região. A proposta inclui a adaptação de vias que possam ser alagadas e de calçadas elevadas, permitindo a circulação entre as residências mesmo durante as cheias. Essa abordagem reconhece que soluções de infraestrutura, como jardins de chuva ou lagoas de retenção complementadas por Infraestruturas Cinzas, podem não ser suficientes para lidar com os desafios impostos pelas áreas mais vulneráveis, como as cotas baixas da bacia do Mata Fome. Assim, ao invés de tentar aplicar um modelo de urbanização incompatível com o contexto local, sugere-se a formulação de um modelo que integre as dinâmicas naturais ao ambiente urbano, promovendo qualidade de vida e resiliência.

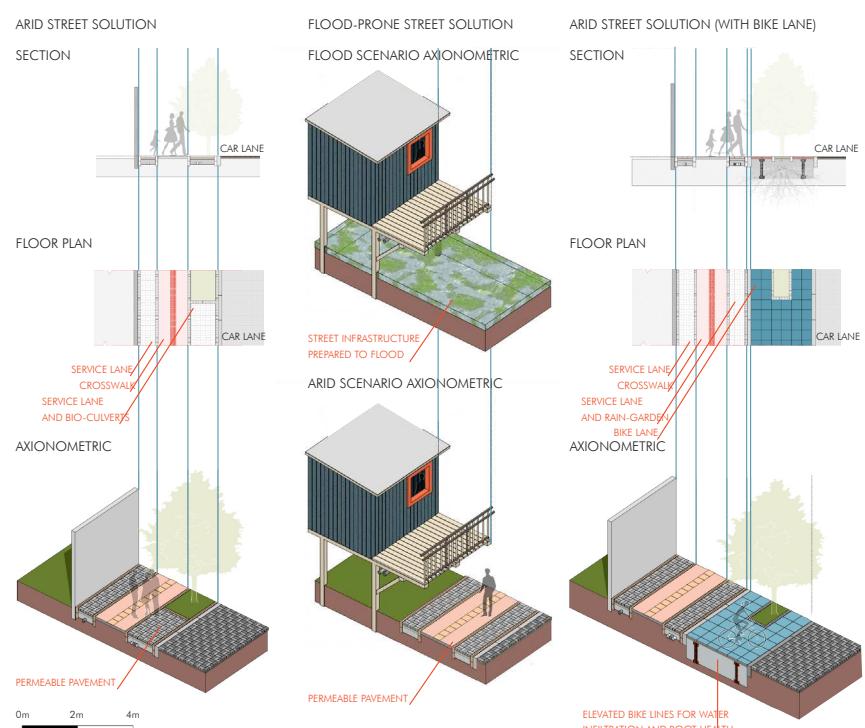
Desde o início deste estudo, em 2022, foi possível compreender que a estratégia ideal não é simplesmente impermeabilizar ou desocupar a área, mas buscar um equilíbrio em que a presença da água seja aceita e incorporada à vivência cotidiana. Essa visão alternativa oferece um caminho para transformar desafios em oportunidades, propondo uma cidade que respeite sua história, seu ambiente e as necessidades de seus habitantes.



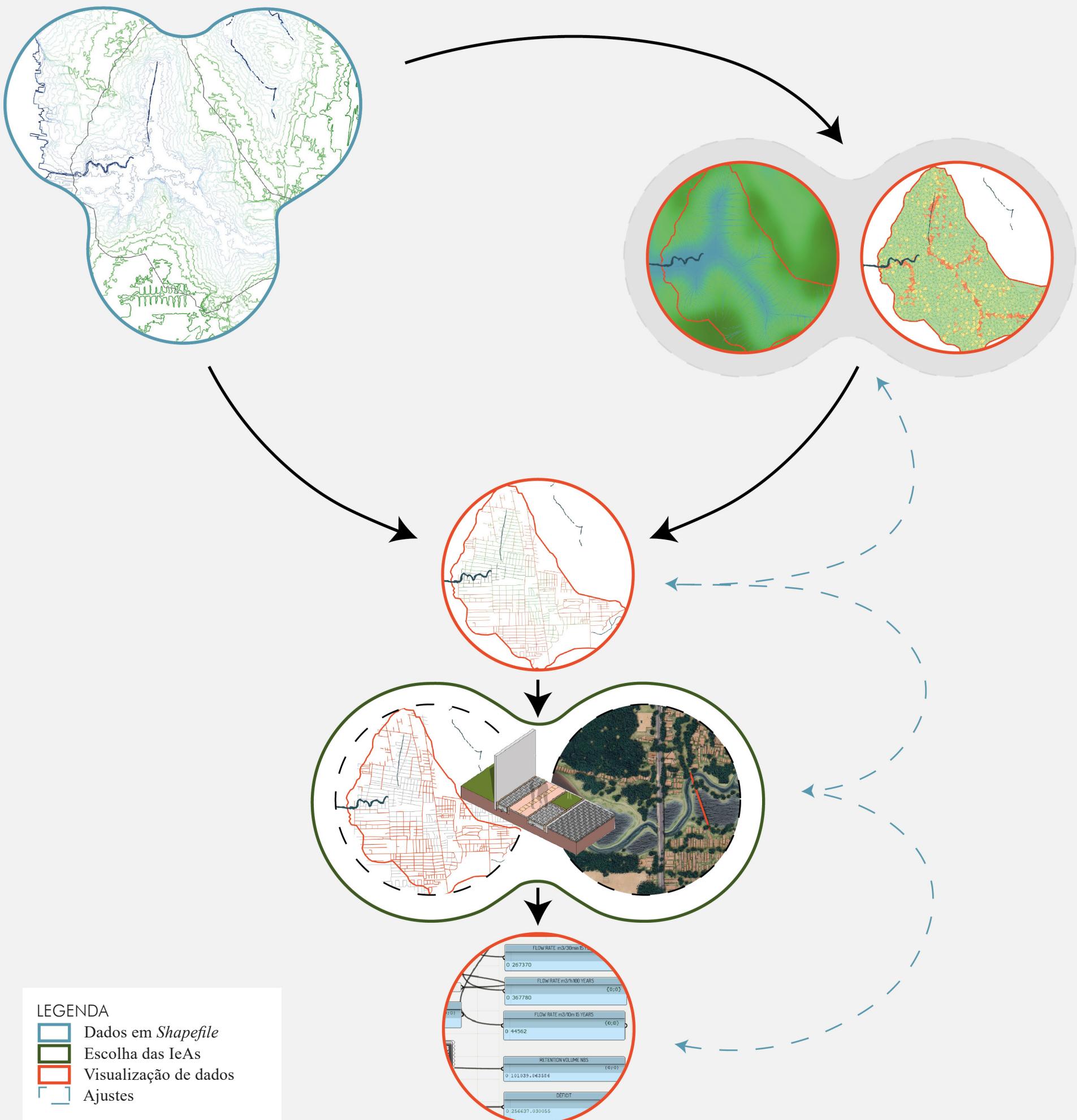
**Figura 53.** Imagens das habitações em palaftas na Bacia do Mata-Fome. Fonte: Acervo da autora, 2023.



**Figura 54.** Ilustração de proposta de alagados naturais para a Bacia do Mata-fome. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.



**Figura 55.** Ilustrações com propostas de tipos viários para cenário ideal da Bacia do Mata-Fome. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.



**Figura 56.** Ilustração das diferentes etapas do algoritmo Tucunaré adaptada ao estudo de caso Belém do Pará. Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

# CAPÍTULO 6

# VALIDAÇÃO DO

# ALGORITMO

Este Capítulo apresenta as experimentações realizadas após o estudo de caso em Belém do Pará. Inicialmente, são discutidos os *workshops* ministrados entre 2022 e 2024, nos quais o Tucunaré foi utilizado por estudantes e profissionais da área. Em seguida, são introduzidos dois novos estudos de caso: um na cidade de Fortaleza e outro em Sobral, nos quais o algoritmo foi empregado. O objetivo principal foi validar a ferramenta desenvolvida junto a atores externos e compreender suas limitações e potencialidades. Com base no estudo de caso anterior, identificou-se a ausência de algumas complexidades inerentes à elaboração de projetos ou análises territoriais completas, que vão além do uso isolado da ferramenta LIM. Conforme abordado no Capítulo 2, a resiliência urbana possui múltiplas facetas, e cada caso demanda uma abordagem específica e complexa. O emprego do algoritmo em situações-problema mais realistas busca contribuir para o enfrentamento dessas questões.

## Tópico 6.1

### WORKSHOP LIM

Desde o início do processo de mestrado, surgiu o interesse em ensinar a outros pesquisadores e projetistas da paisagem o uso de algoritmos para a exploração de estudos da paisagem, visando uma melhor compreensão do comportamento da água em território urbano.

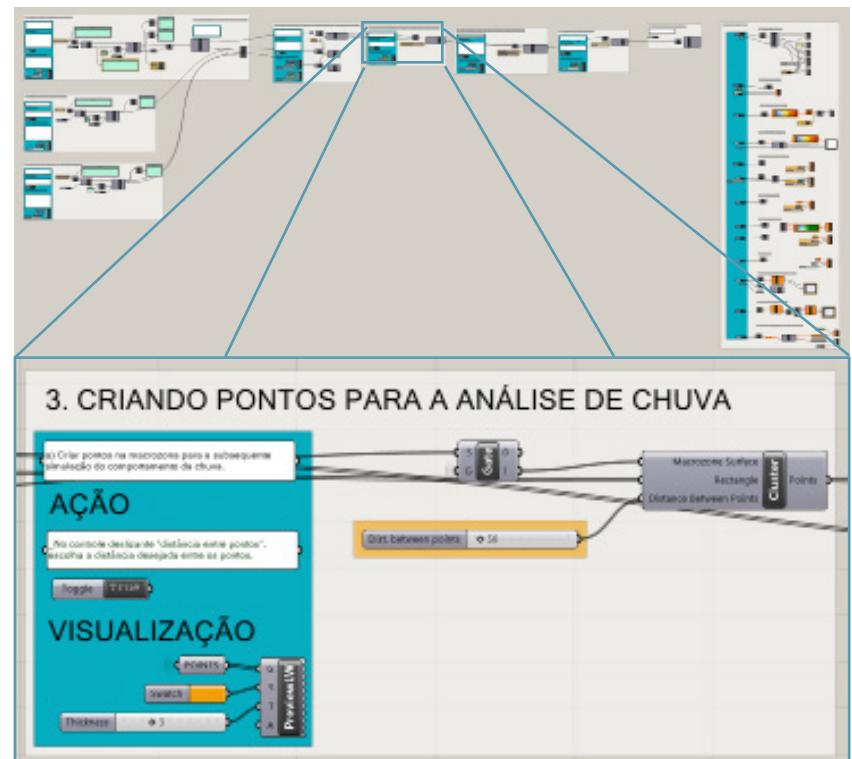
Tal exploração buscava validar a usabilidade do algoritmo por pessoas externas, mesmo que estas não tivessem experiência prévia com o tema ou com os *softwares*. O primeiro esforço foi, então, adequar o Tucunaré para que pudesse operar de forma mais autônoma, exigindo menos esforço do usuário. Além disso, qualquer comando deveria ser explicado, preferencialmente dentro do próprio algoritmo, permitindo que, após uma aula inicial, o usuário pudesse utilizá-lo de forma autônoma em seu próprio computador. Sendo assim, o algoritmo foi simplificado, mantendo apenas a primeira parte da análise territorial, na qual é possível observar mapas topográficos e o comportamento pluvial. Essa escolha também foi necessária devido ao tempo limitado dos *workshops* ministrados.

A primeira experimentação com a versão simplificada do Tucunaré por pessoas externas ocorreu em 2022, na disciplina de Modelagem da Informação Aplicada à Paisagem, ministrada pelo professor Newton Becker no curso de Pós-Graduação em Arquitetura, Urbanismo e Design da Universidade Federal do Ceará. Durante duas aulas de 4 horas, realizadas em parceria com o aluno João Pedro Deodato, foi explicado o funcionamento do algoritmo, e os demais colegas (10 alunos) foram convidados a construí-lo seguindo um passo-a-passo em tempo real. Essa abordagem foi escolhida porque os integrantes da disciplina buscavam compreender com maior profundidade o uso do programa e as funcionalidades do Tucunaré.

Nessa primeira experimentação, foi possível observar uma certa dificuldade dos estudantes em usar o Grasshopper, devido à falta de familiaridade prévia com suas funcionalidades. Além disso, os conteúdos iniciais foram considerados abstratos pelos participantes, por não tratarem diretamente do tema central, o LIM, mas sim de conceitos básicos sobre o comportamento do programa. Concluiu-se então, que, em



**Figura 57.** Imagem do workshop LIM no Geodesign South America em 2024. Fonte: Acervo da autora, 2024.



**Figura 58.** Imagem do Tucunaré simplificado utilizado nos workshops. Fonte: Acervo da autora, 2024.

cursos curtos, não seria produtivo detalhar a construção do algoritmo ou explicar o funcionamento interno das funções, pois isso demandaria mais tempo e um interesse além dos objetivos do Tucunaré. Além disso, o domínio de programação, de maneira geral, não é o foco de planejadores da paisagem, tornando necessária uma readequação do modelo de aulas para os próximos *workshops*.

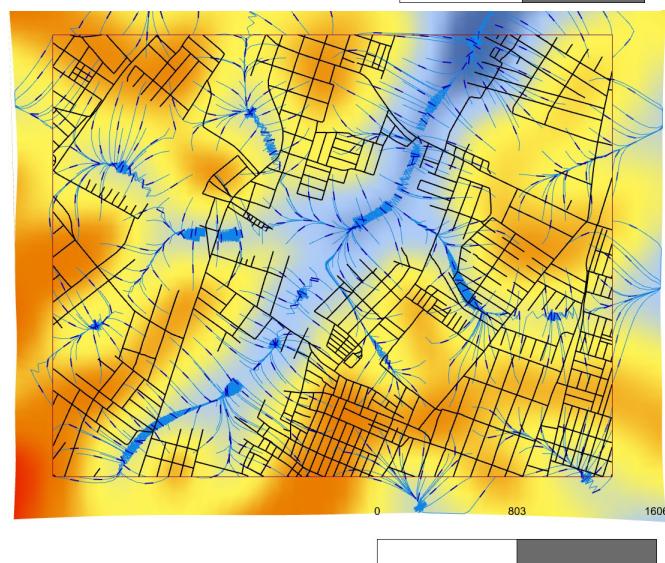
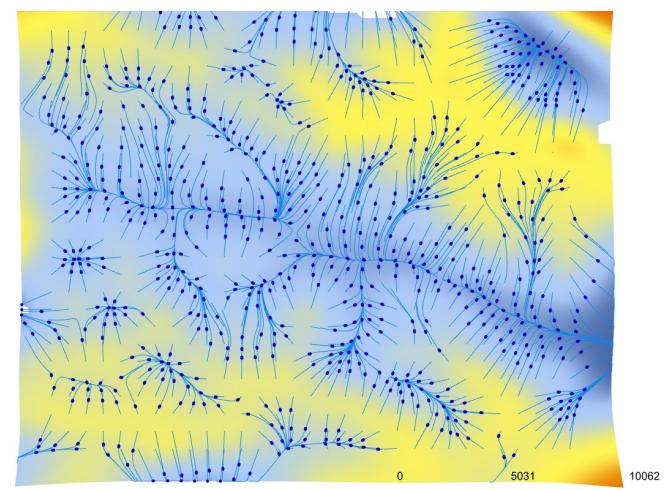
Nas três experimentações seguintes, encontrou-se um “terreno comum”, em que os *workshops* “LIM” foram ministrados sem grandes alterações entre si. Com base nas lições aprendidas, o algoritmo passou a ser entregue pronto aos participantes, que apenas seguiram um passo-a-passo simplificado para alcançar o resultado final: os mapas gráficos. As etapas foram: instalação do programa e *plugins* necessários; importação e ajustes dos *shapes* de curvas de nível do estudo de caso; pequenos ajustes no algoritmo para adequação ao recorte escolhido; e montagem e exportação dos mapas como imagens.

O segundo *workshop* foi ministrado de forma remota no Congresso SIGraDi 2023 para 5 participantes, ao longo de 3 dias, com 2 horas diárias. O número reduzido de participantes possibilitou um acompanhamento mais próximo, e o formato remoto não prejudicou os resultados.

O terceiro *workshop*, realizado no Congresso *Geodesign South America* em 2024, contou com 15 participantes, distribuídos em 2 dias, com 1 hora e meia por dia. Nele, foram necessários 2 tutores para atender às dúvidas, e o uso de um laboratório com o *software* já instalado otimizou o tempo disponível.

Por fim, o último *workshop* foi ministrado na disciplina de Gestão Urbana e Ambiental do Curso de Especialização em Gestão Ambiental Pública da Universidade Estadual do Vale do Acaraú, para uma turma de 20 alunos. Seguindo os mesmos moldes dos anteriores, esse *workshop* trouxe novas percepções, pois foi realizado com profissionais de órgãos públicos de diferentes especialidades. Nesse caso, alunos com maior familiaridade com o tema formaram grupos com os de áreas não correlatas. Como resultado, mesmo os alunos com mais dificuldades conseguiram se envolver na atividade e compreender o funcionamento da metodologia proposta.

A análise dos resultados dos *workshops* evidencia a evolução do algoritmo Tucunaré, tanto em acessibilidade quanto em aplicabilidade prática. No primeiro *workshop*, em 2022, os desafios identificados demonstraram a necessidade de simplificar o processo. Nos eventos subsequentes, realizados entre 2023 e 2024, observou-se uma melhora significativa na usabilidade, com participantes alcançando resultados satisfatórios em contextos variados. Além disso, a abordagem de dividir tarefas em etapas bem definidas e de formar grupos colaborativos demonstrou ser eficaz para engajar todos os participantes, independentemente de suas formações prévias. Com base nos resultados, conclui-se que o Tucunaré apresenta potencial como ferramenta acessível e funcional para planejadores da paisagem e profissionais externos, desde que aplicado em formatos adaptados às características do público e ao tempo disponível.



**Figura 59.** Exemplos de mapas produzidos pelos participantes dos workshops LIM.

Fonte: Acervo da autora, 2023.

## Tópico 6.2

### O CASO BOM JARDIM

Durante o período dedicado ao desenvolvimento desta dissertação, a autora teve a oportunidade de participar em projetos voltados para a implementação de SBN na paisagem urbana. Entre esses projetos, destaca-se aqui o “Projeto Cidade Presente”, originalmente intitulado “Projeto Desenvolvimento Urbano Sustentável” (DUS), uma iniciativa conjunta do Ministério das Cidades em parceria com o Ministério Federal da Cooperação Econômica e do Desenvolvimento da Alemanha, através da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ), agência alemã para a cooperação técnica internacional. O edital lançado em março de 2023 visava selecionar propostas de projetos demonstrativos de desenvolvimento urbano integrado, inclusivo e resiliente ao clima. Esses projetos integrariam uma lista de projetos-pilotos a serem apoiados pelo DUS, por meio de uma assessoria técnica especializada para aperfeiçoamento e troca de experiências com municípios participantes, visando sua posterior execução pelos municípios.

O projeto foi estruturado em duas etapas distintas: a) Na primeira, foram selecionadas até 12 propostas de iniciativas de municípios, as quais foram submetidas a um processo de consultoria especializada fornecida pelo DUS, além de participarem de intercâmbios de experiências entre os municípios; b) Na segunda etapa, a continuidade da assessoria técnica se restringiu a 6 municípios, selecionados entre os participantes da primeira. Enquanto a primeira etapa transcorreu entre os meses de maio e agosto de 2023, a segunda ainda está em curso (Fortaleza, 2024).

Nesse contexto, houve a oportunidade de contribuição para a aprovação do projeto intitulado “Caminhos Verdes e Azuis” da cidade de Fortaleza, coordenado pelo IPPLAN, que se concentrou na manutenção urbana de um trecho de canal nos Bairros Bom Jardim, Granja Lisboa e Granja Portugal. Através da modelagem paramétrica, foi possível realizar diagnósticos da situação atual e oferecer sugestões de abordagem para a implementação de SBN, visando a melhoria da resiliência urbana por meio de soluções de Infraestrutura Azul. Além do grupo de pesquisa do qual a autora faz parte, a iniciativa envolveu parceiros-chave, incluindo a Prefeitura de Fortaleza, por meio do IPPLAN, a Secretaria Municipal de Infraestrutura (SEINF) e a Secretaria Executiva Regional V.

Ao longo do ano de 2023, o caso em questão foi aprovado nas duas etapas do processo e se encontra, no presente momento, nos últimos meses da segunda etapa, a acessoria técnica.

#### 6.2.1 O CONTEXTO

Fortaleza, capital do estado do Ceará, passou por um impressionante crescimento populacional ao longo das últimas seis décadas, expandindo-se quase cinco vezes, de 514 mil habitantes em 1960 para aproximadamente 2,4 milhões em 2010 (IBGE, 2010). Sendo a quinta maior cidade do Brasil. As consequências dessa rápida expansão são especialmente evidentes nos assentamentos informais de baixa renda, que atualmente abrigam mais de 40% da população da cidade (Fortaleza, 2016).



**Figura 60.** Ilustração da seleção dos municípios brasileiros para a segunda fase do Projeto Cidade Presente. Fonte: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/assuntos/noticias-1/conheca-os-municipios-selecionados-para-parceria-com-projeto-dus-da-cooperacao-brasil-alemanha>>. Acesso em: 7 maio. 2024.



**Figura 61.** Imagem do workshop com crianças do território do Bom Jardim realizado pela equipe. Fonte: Acervo da autora, 2024.

Além disso, a cidade enfrenta o desafio crescente do aumento das temperaturas ao longo do século XXI, uma consequência direta do incremento das emissões de gases de efeito estufa, conforme apontado pelo PBMC (2016). Projeções futuras indicam uma elevação ainda mais acentuada nos níveis de temperatura. Por essa razão, Fortaleza é considerada uma cidade altamente vulnerável aos impactos das mudanças climáticas pelo PBMC (2016). Essa vulnerabilidade é especialmente agravada no contexto dos assentamentos informais, intensificando os riscos enfrentados pelos seus habitantes.

A pesquisa desenvolvida para o “Projeto Cidade Presente” concentrou-se em uma região a sudeste de Fortaleza — o distrito do Grande Bom Jardim, o qual está localizado na região com o menor Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) da cidade, caracterizando-se por serviços de infraestrutura urbana inadequados e significativos desafios sociais e ambientais (IBGE, 2010).

Ao longo das últimas seis décadas, a área experimentou um rápido crescimento devido ao influxo da população de baixa renda e o governo não forneceu suporte suficiente para acomodar adequadamente esse crescimento, resultando em diversas problemáticas, especialmente relacionadas à habitação. Consequentemente, a região enfrenta disparidades socioeconômicas, com níveis de renda e alfabetização abaixo da média da cidade. Além disso, as taxas de crescimento populacional nesta área superam as de regiões com melhor infraestrutura e serviços urbanos (IBGE, 2010).

No entanto, em meio a esses desafios, o Grande Bom Jardim abriga um dos grupos sociais mais proativos e engajados e que busca persistentemente uma melhor qualidade de vida. Apesar de ser observado um notável crescimento de movimentos de empreendedorismo social, com foco específico no fortalecimento de investimentos em habitação e complexos de uso misto em Fortaleza, há um considerável destaque nesse quesito no Grande Bom Jardim.

Assim sendo, dado o forte engajamento comunitário, os altos níveis de participação e o potencial inexplorado da economia criativa local, a oportunidade de trabalhar com o Grande Bom Jardim foi vista como um meio de abordar a vulnerabilidade ambiental da região e melhorar as condições de vida de sua população.

A intervenção foi escolhida para ser realizada no bairro Granja Portugal, inserido no distrito do Grande Bom Jardim. O trecho do riacho onde será localizada a intervenção física do projeto está situado em uma bacia hidrográfica do Rio Maranguapinho.

### 6.2.2 O USO DO ALGORITMO

A análise inicial de precipitação no algoritmo desempenha o papel de identificar a área que impacta o trecho de córrego estudado, considerando a contribuição de diferentes regiões para os eventos de alagamento. Utilizando o Tucunaré, foi possível modelar o comportamento da água no terreno e gerar uma representação gráfica dos padrões de precipitação. Após determinar a área microzona de impacto, simulações adicionais ajudaram a refinar a análise, oferecendo dados mais precisos para a tomada de decisões sobre o gerenciamento da água e suas implicações.

A modelagem avançou ao estimar o volume de água que precisaria ser absorvido pela infraestrutura. Essa equação levou em conta



Figura 62. Mapas da localização de Fortaleza. Fonte: Carvalho, 2023b.

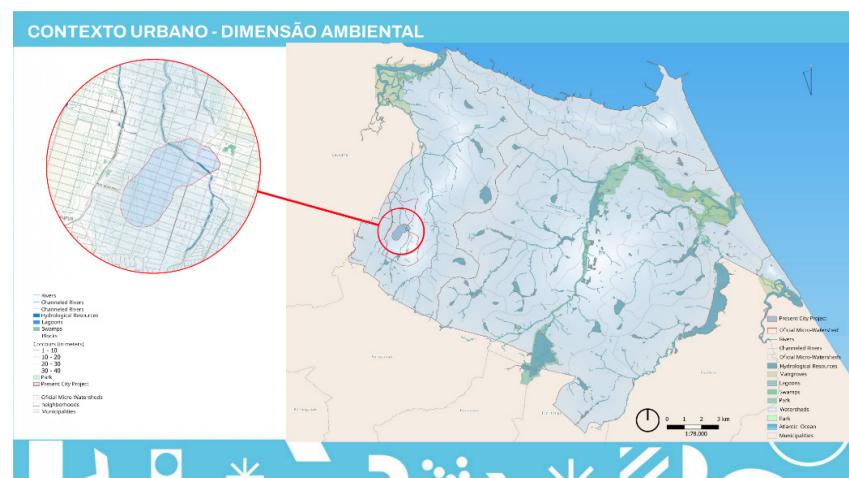


Figura 63. Mapas da localização da microbacia do caso Bom Jardim em Fortaleza. Fonte: Carvalho, 2023b.

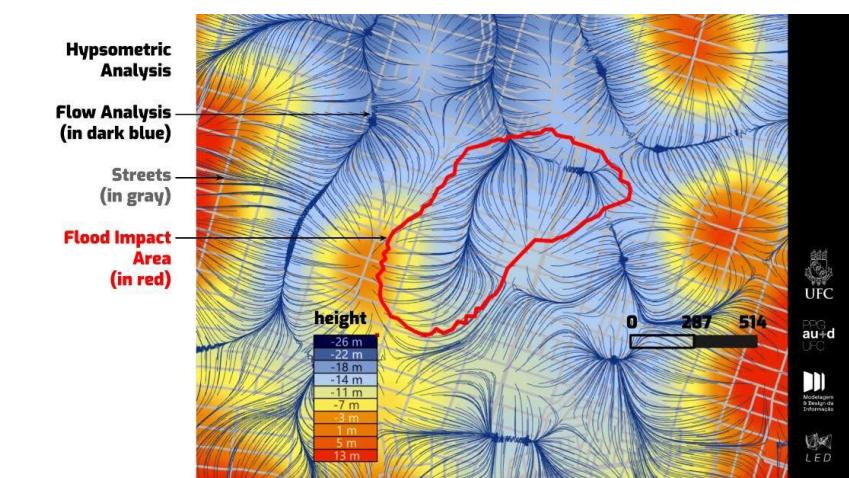


Figura 64. Mapa do cainimento pluvial no caso Bom Jardim. Fonte: Carvalho, 2023b.

uma taxa de escoamento definida para um período de retorno de 100 anos. A área de impacto foi calculada em 0,46 km<sup>2</sup>, e a capacidade de retenção necessária foi estabelecida em 279.479,58 L/h, com a meta de garantir a absorção das águas pelas Infraestruturas Azuis sugeridas.

Em paralelo, a análise multi-critério indicou as vias mais adequadas para implementar as IeA, considerando a capacidade de retenção de água. O algoritmo possibilitou a escolha de ruas prioritárias com base nas características topográficas do território, as quais, por sua vez, foram selecionadas para a intervenção devido ao seu tamanho, comprimento e distribuição ao longo da área impactada. A última etapa do algoritmo indicou que a intervenção seria capaz de reter aproximadamente 975.000 L/h, superando a meta de retenção inicial de 279.479,58 L/h.

No contexto do “Projeto Cidade Presente”, essa primeira proposta foi reformulada devido a restrições financeiras e objetivos municipais, focando em uma intervenção em um trecho específico de rua e rio como um “experimento”. Essa abordagem buscou exemplificar as mudanças possíveis, considerando as limitações financeiras e criando um modelo para futuras intervenções sustentáveis na cidade. O algoritmo proporcionou uma compreensão clara das limitações e possibilidades do projeto, com base em dados concretos.

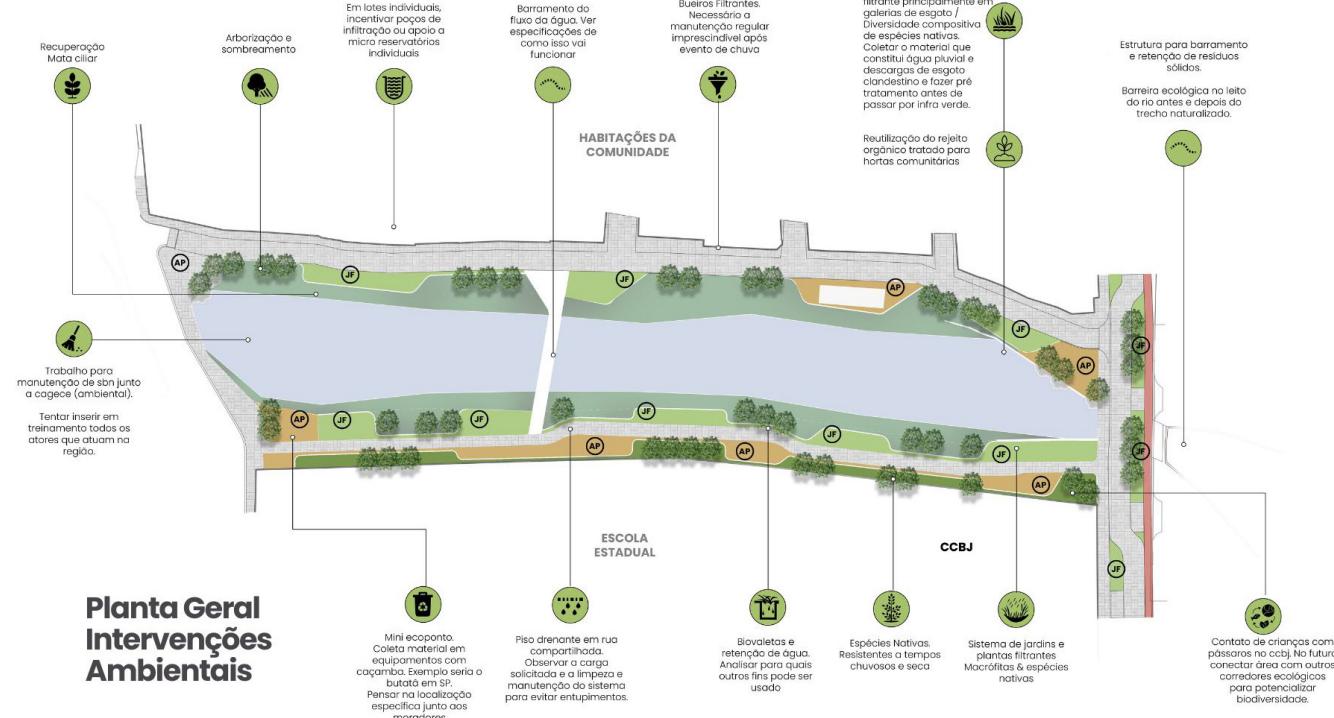
Embora o impacto imediato na drenagem da cidade ser limitado, o projeto buscou estabelecer um exemplo positivo para ser seguido por outras iniciativas. O algoritmo, desenvolvido por uma equipe de arquitetos paisagistas, foi considerado uma ferramenta de engajamento para profissionais fora do ambiente acadêmico, contribuindo para a validação e aprimoramento da proposta final. A colaboração com atores públicos foi vista como um passo fundamental para consolidar a intervenção e reduzir lacunas técnicas do algoritmo.



**Figura 65.** Mapa da análise multicritério com as vias prioritárias para IeA. Fonte: Carvalho, 2023b.



**Figura 66.** Mapa da proposição de implantação de IeAs pelos pesquisadores. Fonte: Carvalho, 2023b.



**Figura 67.** Ilustração do projeto preliminar de implantação de SBN pela equipe do Projeto Caminhos Verdes e Azuis no trecho de canal do Rio Maranguapinho. Fonte: Acervo interno do IPPLAN, 2024.

### 6.2.3 LEVANTAMENTO DE INDICADORES

Tendo em vista o uso de tecnologias consideradas inovadoras para a localidade em que serão implementadas, o projeto prevê, além do novo desenho urbano em si, também o levantamento de dados ambientais e sociais da situação atual do território, seguido da criação de indicadores. A partir deles, é possível avaliar o desempenho das infraestruturas, bem como sua interação com os moradores. Como mencionado no Capítulo 4, o uso de dados em constante atualização é essencial para potencializar o uso de modelos informacionais, acompanhando o antes e o depois da instalação de elementos como as Infraestruturas Azuis.

Essa primeira exploração da criação de indicadores relacionados à temática foi limitada pelos recursos disponíveis para o projeto, tendo sido realizada pela autora junto à equipe do IPPLAN ao longo de outubro de 2024. Foram levantados dados por meio de coletas, questionários e *workshops* durante visitas ao local, além de dados secundários de outros órgãos da prefeitura de Fortaleza.

Os levantamentos tiveram como objetivo obter indicadores dos temas: água, ambiente, espaço público, resíduos, saneamento, saúde, habitação e social. A Tabela 5 apresenta todos os indicadores que foram possíveis de levantar. Eles foram estipulados pela prefeitura em parceria com a empresa responsável pela assistência técnica do Projeto Cidade Presente e visam ser monitorados antes e após à execução do projeto para seu aprimoramento contínuo.

O presente trabalho não tem o objetivo de se aprofundar na criação de indicadores, contudo, ao longo do processo e com as experiências adquiridas, observou-se que esse foi um fator-chave nos estudos de caso que saíram do “laboratório” e foram tratados com outros atores. Para validar um *design* baseado em dados com o uso do LIM, é necessária a criação de parâmetros que possam ser comparados e avaliados ao longo do tempo. No caso do Bom Jardim, não serão apresentados a metodologia de coleta ou os resultados detalhados, pois se trata de um trabalho em andamento e ainda não publicado. Serão pontuados apenas alguns resultados e como estes afetaram a percepção do local e os passos seguintes do projeto.

Primeiramente, é importante destacar a questão do saneamento na região. No levantamento de qualidade da água do recurso hídrico, foi encontrado um valor de coliformes termotolerantes de 210.000 NMP/100 mL, muito acima do valor aceitável de até 2.500 NMP/100 mL. Esse resultado inviabiliza o serviço ecossistêmico de SBN que visam à limpeza do recurso hídrico, como os jardins filtrantes, pois seu rendimento dentro da área proposta pelo projeto está abaixo do necessário. Em resumo, esse é um caso de falta de saneamento básico, provavelmente devido a contribuições irregulares de esgoto domiciliar. Apenas um plano de saneamento para a bacia hidrográfica inteira teria impacto relevante no tema do saneamento.

Outro aspecto relevante que impacta diretamente os resultados de um projeto com essas características é a clara falta de disposição adequada dos resíduos sólidos na região. O mapa da Figura 68 ilustra todos os pontos de lixo irregular que foram catalogados durante uma das visitas de campo. Essa informação destaca a urgência de um plano para o manejo adequado dos resíduos sólidos na região, além da necessidade de educar os moradores locais para garantir o descarte adequado do

TIPO	INDICADOR
Água	Infiltração de Água da Chuva
Água	Índice de Qualidade da Água em Corpos Hídricos Urbanos
Ambiental	Índice de Conforto Térmico Melhorado
Ambiental	Índice de Qualidade do Ar
Ambiental	Índice de Biodiversidade de Flora
Ambiental	Área Verde por Habitante
Espaço Público	Taxa de Utilização do Espaço Público
Espaço Público	Taxa de Ocupação Temporal do Espaço Público
Espaço Público	Índice de Acessibilidade Universal
Espaço Público	Taxa de Repartição Modal
Espaço Público	Modo de Deslocamento Populacional
Espaço Público	Acesso aos Serviços Públicos
Resíduos	Índice de Retirada de Resíduos
Resíduos	Índice de Reciclagem Domiciliar
Resíduos	Disposição Inadequada de Resíduo no Espaço Público
Saneamento	Extensão da Rede de Esgoto
Saúde	Taxa de Incidência de Doenças Relacionadas ao Saneamento Básico
Habitação	População em Assentamentos Precários
Habitação	Ocupações Irregulares
Social	Taxa de Satisfação dos Usuários
Social	Índice de Percepção de Segurança
Social	Índice de Equidade e Inclusão
Social	Segurança - homicídio

**Tabela 5** Indicadores levantados para o Projeto Caminhos Verdes e Azuis. Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

lixo domiciliar. Esse tema se tornou central no projeto Caminhos Verdes e Azuis após as primeiras visitas. O despejo inadequado de resíduos também inviabilizaria o uso de IeAs, pois promoveria o entupimento dos meios de infiltração da água, necessários para seu funcionamento adequado.

Além dos resultados obtidos, é importante destacar que a natureza do Projeto Cidade Presente impõe limitações significativas às capacidades dos órgãos municipais em alocar os recursos necessários para um *design* dessa complexidade. Como o edital não conta com financiamento inicial, as municipalidades precisam redirecionar recursos já existentes para atividades como o levantamento mencionado, o que pode ser inviável devido às demandas cotidianas. Esse fator fragiliza não só o projeto, mas também sua replicabilidade e sustentabilidade a longo prazo. Para garantir o sucesso e a continuidade das intervenções, seria necessário um compromisso contínuo do órgão público, seja por meio de trabalho interno ou por contratações externas, algo que, até o presente momento, não está previsto pelo município de Fortaleza.

Em conclusão, o levantamento realizado ao longo do desenvolvimento do projeto foi a ferramenta que permitiu catalogar os aspectos mencionados anteriormente. Os resultados obtidos, como os problemas de saneamento e a inadequada disposição de resíduos, não apenas informam as intervenções imediatas, mas também servem de base para ajustes contínuos nas infraestruturas propostas. O acompanhamento constante desses indicadores permitirá a adaptação do projeto em tempo real, assegurando sua eficácia a longo prazo. Esse fato reforça o aspecto do LIM, mencionado no Capítulo 4, sobre a importância da utilização de dados em constante atualização.

#### 6.2.4 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES DO CASO

O estudo de caso sobre a implementação de Infraestruturas Azuis no Grande Bom Jardim, Fortaleza, revela que a análise de dados socioambientais deve ser o ponto de partida para o planejamento das SBN, pois impacta diretamente nas decisões sobre as áreas a serem priorizadas. O uso de LIM no contexto local permitiu mapear as áreas mais vulneráveis e integrar soluções adaptativas com o perfil da comunidade. Além disso, a coleta de dados permitiu avaliar as limitações das intervenções e as outras atitudes que devem ser tomadas no local levando em consideração todos os aspectos que tangem a resiliência urbana.

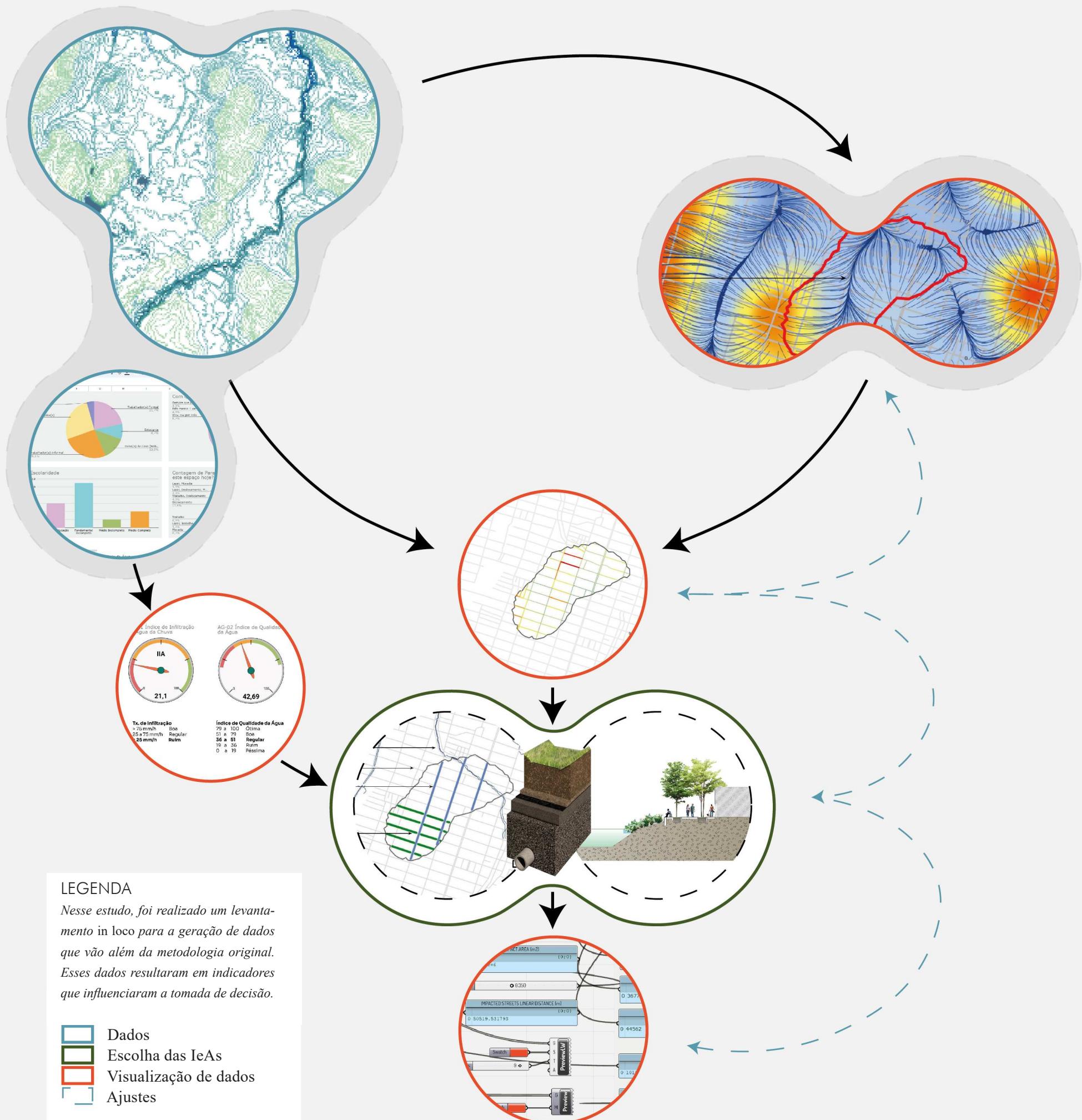
A implementação bem-sucedida de IeAs exige dados atualizados sobre os aspectos do território urbano, desde as condições ambientais até os indicadores sociais. O uso do LIM depende da qualidade desses dados, permitindo não apenas a modelagem precisa, mas também o monitoramento contínuo das mudanças pós-implementação. Além disso, é necessário que discussões com atores diversos, como os gestores públicos e a comunidade local, integrem o processo, pois o sucesso de projetos urbanos resilientes vai além da aplicação de algoritmos e requer uma abordagem colaborativa e informada.



**Figura 68.** Mapa do levantamento de resíduos sólidos na região de estudo no Grande Bom Jardim. Fonte: Produzida pela autora com dados do IPPLAN, 2024.



**Figura 69.** Imagem de trecho de riacho onde o levantamento de resíduos sólidos foi realizado no caso Bom Jardim. Fonte: Acervo da autora, 2024.



**Figura 70.** Ilustração das diferentes etapas do algoritmo Tucunaré adaptada ao estudo de caso Bom Jardim. Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

## Tópico 6.3

### O CASO SOBRAL

Outro projeto desenvolvido pela autora durante a dissertação foi a consultoria para avaliação do impacto socioambiental dos jardins filtrantes implantados na cidade de Sobral, no estado do Ceará. Os jardins foram finalizados no ano de 2020 no Parque da Cidade e Parque Pajeú para que dessem suporte à melhora da qualidade da água do Rio Pajeú.

A autora, junto a outros pesquisadores do LED, atuou como consultora para o consórcio Certare-Geasa, constituído pelas empresas Certare Engenharia e Consultoria Ltda e Geasa Engenharia Ltda, sob a liderança da bióloga Maitê Bueno Pinheiro (para mais detalhes sobre as pessoas envolvidas, ver os agradecimentos da dissertação), através da Chamada Pública Nº CH23001-SEUMA. A chamada foi lançada pela Prefeitura Municipal de Sobral junto ao Banco de Desenvolvimento da América Latina e Caribe (CAF) (Pinheiro *et al.*, 2024).

Lançada em 2024, a chamada resultou em uma produção estruturada em sete etapas, que geraram sete relatórios ou produtos: Plano de Trabalho e Análise das Informações Disponíveis, Diagnóstico e Desempenho dos Jardins Filtrantes, Diagnóstico e Propostas de Melhorias para a Operação e Manutenção, Avaliação da Percepção Socioambiental e do Retorno Econômico dos Jardins Filtrantes, Avaliação da Viabilidade da Replicabilidade da Solução Baseada na Natureza em Sobral, Relatório Final e Publicação.

Enquanto consultora, a autora esteve mais envolvida no Produto 1, referente à análise dos dados territoriais disponíveis da cidade de Sobral e dos jardins filtrantes analisados, e no Produto 5, que trata da avaliação da viabilidade da replicabilidade das SBN em Sobral. Essa alocação ocorreu porque os pesquisadores foram consultados com base em sua especialização no uso de modelagem da informação para avaliação e proposição de SBN. Por consequência esses produtos se alinharam melhor ao tema de estudo da autora. Dessa forma, nos tópicos seguintes, será destacado o uso do LIM nesse estudo de caso, com foco nos produtos nos quais os pesquisadores tiveram maior contribuição.

Vale ressaltar que todos os dados compartilhados neste texto foram construídos coletivamente com os profissionais envolvidos na licitação, com base nas informações públicas presentes na publicação final do trabalho e/ou na produção da consultoria.

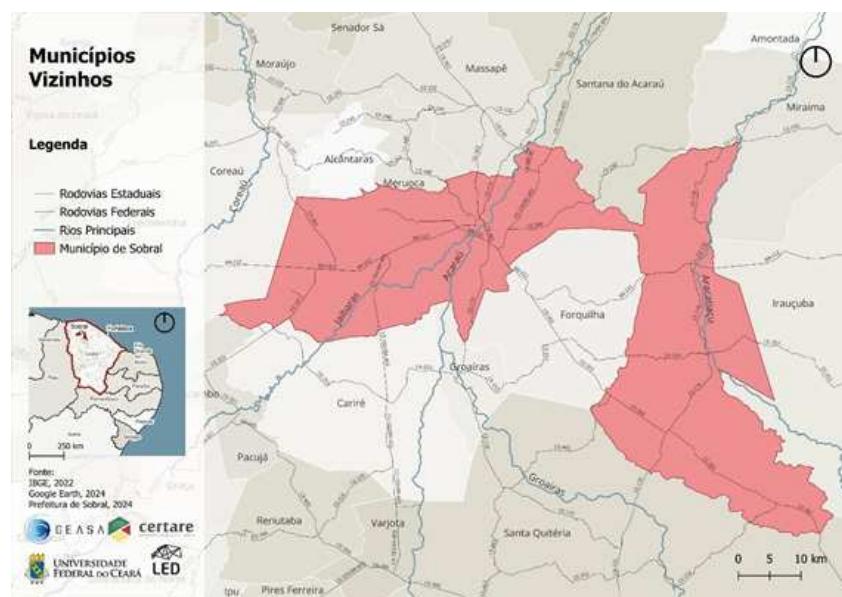


Figura 71. Mapa do município de Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024.

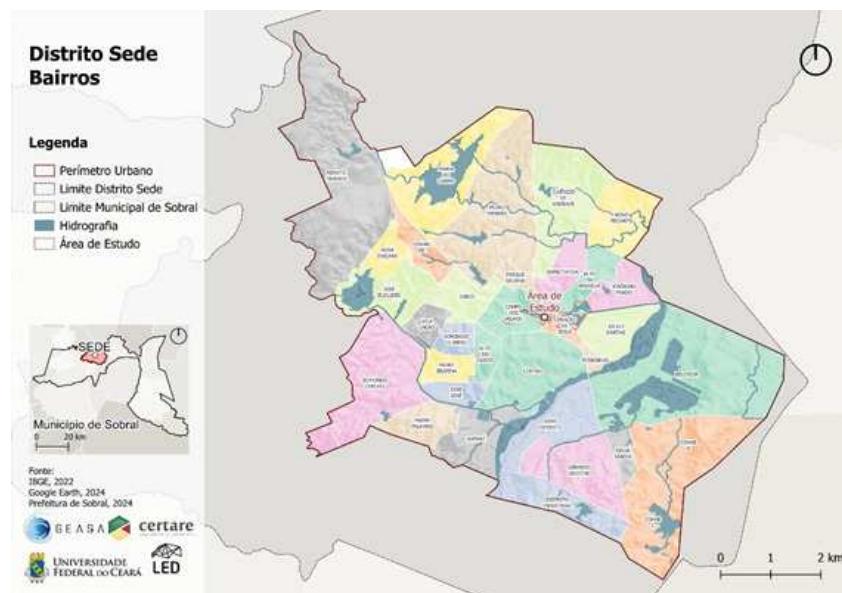


Figura 72. Mapa do distrito-sede do município de Sobral. Fonte: Elaborado pelo consórcio, 2024.



### 6.3.1 O CONTEXTO

O município de Sobral, localizado no semiárido cearense, enfrenta desafios significativos relacionados à gestão dos recursos hídricos. A fim de mitigar os impactos da urbanização e da poluição sobre o corpo hídrico local, o riacho Pajeú, foram implantados Sistemas de Alagados Construídos (SACs), popularmente conhecidos como jardins filtrantes.

Com uma população estimada em 203.023 habitantes (IBGE, 2022), Sobral apresenta uma demanda crescente por recursos hídricos. O clima semiárido, caracterizado por longos períodos de seca, agrava essa situação, tornando a gestão da água um desafio constante. A implementação dos SACs surge como uma alternativa sustentável para o tratamento de efluentes domésticos, contribuindo para a melhoria da qualidade da água do riacho Pajeú e, consequentemente, da bacia hidrográfica.

Os SACs, instalados em áreas estratégicas do município, como o Parque da Cidade e o Parque Pajeú, utilizam processos naturais para remover poluentes presentes na água. Através de um leito composto por material poroso e vegetação, os efluentes são submetidos a processos físicos, químicos e biológicos, resultando na remoção de matéria orgânica, nutrientes e microrganismos patogênicos.

A área total ocupada pelos SACs em Sobral é de 6.772 m<sup>2</sup>, distribuídos em 15 unidades no Parque da Cidade e 5 no Parque Pajeú. Essa tecnologia, além de contribuir para a melhoria da qualidade ambiental, apresenta um potencial significativo para a promoção da educação ambiental e a criação de áreas verdes urbanas.

O Tucunaré foi inserido inicialmente no projeto para o diagnóstico inicial do comportamento pluvial no território para o entendimento das áreas de influência de drenagem na área dos jardins filtrantes. Esta primeira etapa será abordada no próximo tópico.

### 6.3.2 O USO DO ALGORITMO NO DIAGNÓSTICO

Com uma predominância de áreas planas, a cidade de Sobral apresenta algumas variações de relevo, incluindo regiões mais baixas e outras mais elevadas. Os jardins filtrantes estão localizados em uma zona mais baixa da cidade, isso permite que eles recebam contribuições hídricas de uma área extensa ao seu redor. Por estar em uma região mais baixa, os jardins filtrantes têm a capacidade de captar as águas pluviais que fluem naturalmente para essa área, provenientes de encostas, vias urbanas e outros pontos de coleta de água. Essa característica torna os jardins filtrantes uma importante Infraestrutura Verde para o gerenciamento sustentável das águas pluviais em Sobral.

A análise do escoamento pluvial no território de estudo, realizada a partir das curvas de nível, permitiu delimitar a área da bacia de contribuição pluvial do jardins filtrantes instalados no Parque da Cidade e no Parque Pajeú, e da bacia de contribuição da Lagoa da Fazenda. No estudo feito a partir do Tucunaré, foram processados os dados, gerando uma representação gráfica do cimento pluvial, conforme apresentado na Figura 76.

Essa representação gráfica proporciona uma visualização da distribuição das águas pluviais na área de estudo, identificando as regiões de maior concentração e direcionamento do escoamento. Com base nesses dados, foi delineada a área de impacto pluvial no equipa-

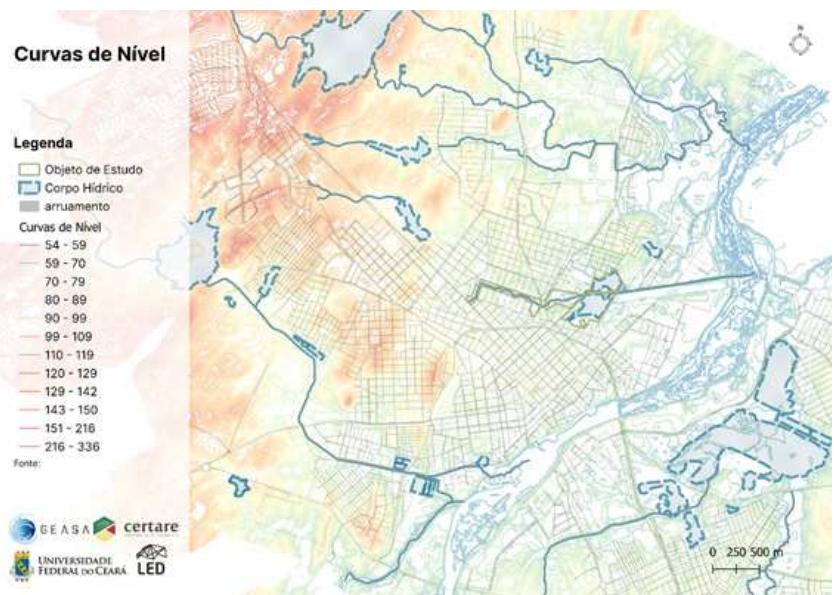


Figura 74. Mapa de curvas de nível de Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio,

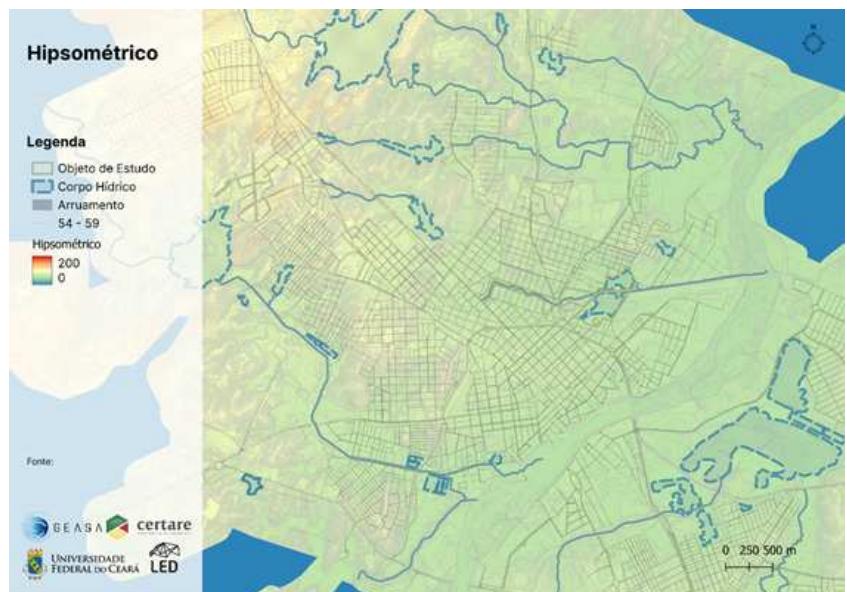


Figura 75. Mapa hipsométrico de Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024.

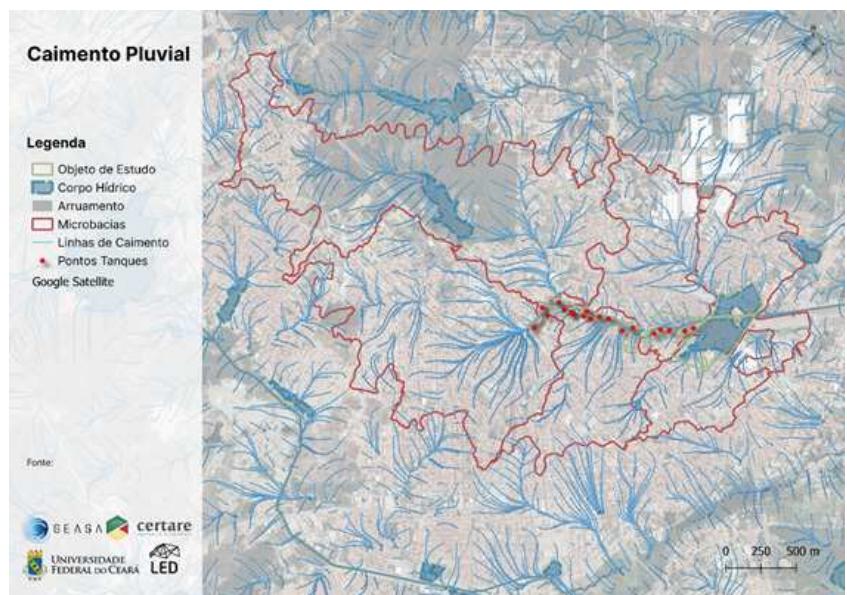


Figura 76. Mapa do cimento pluvial de Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024.

mento. Essa delimitação está compreendida em seis microbacias, delineadas pela equipe de trabalho (diferente de apenas uma, como nos casos anteriores). Elas totalizam uma área de 6,45 Km<sup>2</sup> e indicam quais recortes da cidade levam contribuições de esgoto clandestino aos jardins filtrantes por meio do sistema de drenagem.

### 6.3.3 O USO DO ALGORITMO NA REPLICABILIDADE

Após a primeira análise, a avaliação dos jardins filtrantes prosseguiu, abordando temas como o impacto socioambiental desses sistemas dentro dos Produtos 2 até o Produto 4, mencionados anteriormente. A consultoria com o uso da ferramenta LIM retornou ao trabalho no Produto 5, que trata da replicabilidade das infraestruturas. Aqui, diferente dos casos anteriores, foi adotada uma abordagem mais abrangente, considerando todo o Distrito Sede e propondo indicativos para outros tipos de Infraestruturas Azuis, além de jardins de chuva e biovaletas.

Inicialmente, o algoritmo foi reaplicado em todo o distrito, e o termo “microbacias” foi substituído por “nanobacias” pela equipe do consórcio, devido ao foco em áreas de impacto pluvial menores, que exigem uma metodologia de desenho particular.

Em seguida, para delimitar os locais adequados à implantação de diferentes SBN, foi utilizado o modelo de mapa de adequabilidade, originalmente desenvolvido por McHarg (1969). A aplicação dessa metodologia implicou em uma análise complexa da paisagem do Distrito Sede, considerando a interação entre processos sociais e ambientais. Essa abordagem permitiu identificar um sistema de valores e restrições que influencia a implantação das SBN. O objetivo final foi determinar a adequabilidade dessas soluções para o território analisado.

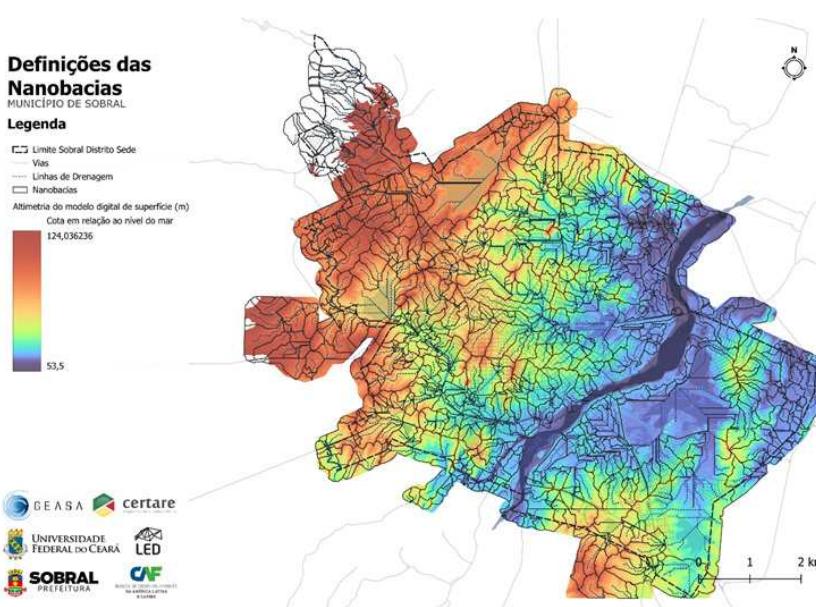
As nanobacias foram utilizadas como unidade de análise para o estudo de adequabilidade e, a partir de diferentes algoritmos baseados no Tucunaré e em outros trabalhos desenvolvidos por João Pedro Deodato Barreto no LED, foram geradas nove camadas de parâmetros relevantes para avaliar a adequabilidade territorial à disposição das SBN:

- Porcentagem de Impermeabilização de Nascentes;
- Porcentagem de Impermeabilização das Nanobacias;
- Porcentagem de Áreas Desprotegidas de Cursos Hídricos;
- Carta de Hipsometria;
- Carta de Concavidade;
- Carta de Declividade;
- Índice de Segurança Hídrica;
- Menor Distância entre Áreas Verdes.

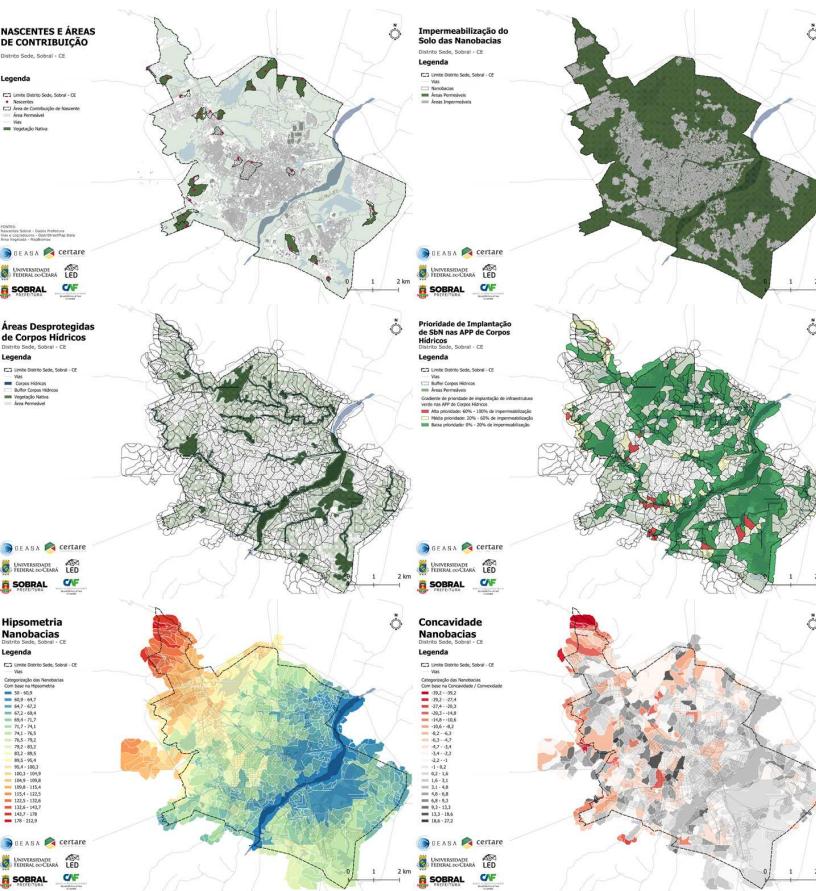
Por fim, essas camadas foram sobrepostas, aplicando diferentes pesos de importância considerados adequados pela equipe para cada tipo de infraestrutura (jardim de chuva, canteiro pluvial, biovaleta e alagado construído), gerando os mapas de adequabilidade (Figura 78).

### 6.3.4 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES DO CASO

O estudo de caso em Sobral ilustra os avanços no uso do LIM no planejamento e avaliação de SBN. Observa-se o uso do LIM como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão pela municipalidade de Sobral. A consultoria proporcionou uma abordagem técnica e integrada, envolvendo desde o diagnóstico inicial das áreas de influência pluvial até a proposição de cenários de replicabilidade no Distrito Sede.



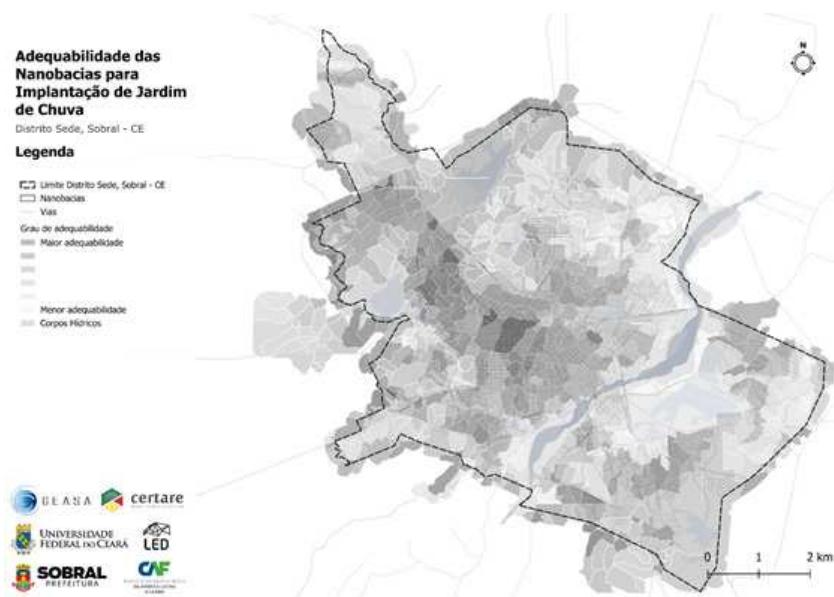
**Figura 77.** Mapa de nanobacias do distrito-sede de Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024.



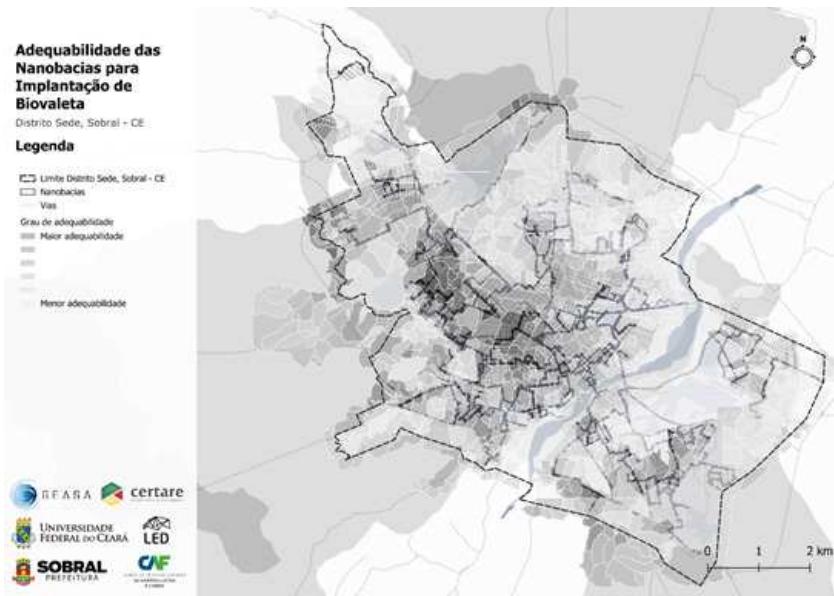
**Figura 78.** Mapas de diferentes camadas de análise no distrito-sede, em Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024.

Além disso, a interdisciplinaridade do projeto, envolvendo pesquisadores, engenheiros e biólogos, e a colaboração direta com a prefeitura de Sobral reforçam a relevância institucional e a aplicabilidade prática das soluções propostas. Esses elementos indicam que a adoção de SBN pode ir além de sua função ambiental, integrando-se como uma ferramenta estratégica para o planejamento urbano sustentável e a resiliência hídrica.

Por fim, este caso destaca o potencial do uso do LIM no fortalecimento de políticas públicas e na capacitação técnica para lidar com os desafios ambientais. Ele também serve como exemplo de como a academia pode contribuir para o desenvolvimento de soluções práticas, inovadoras e replicáveis para os desafios urbanos contemporâneos, especialmente em contextos de vulnerabilidade socioambiental.



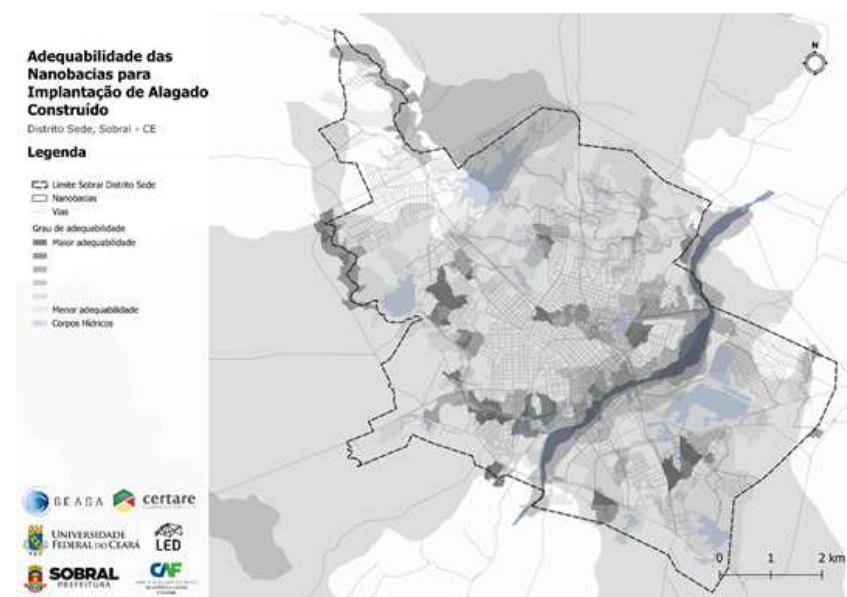
**Figura 80.** Mapa de adequabilidade de jardins de chuva para o distrito-sede de Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024.



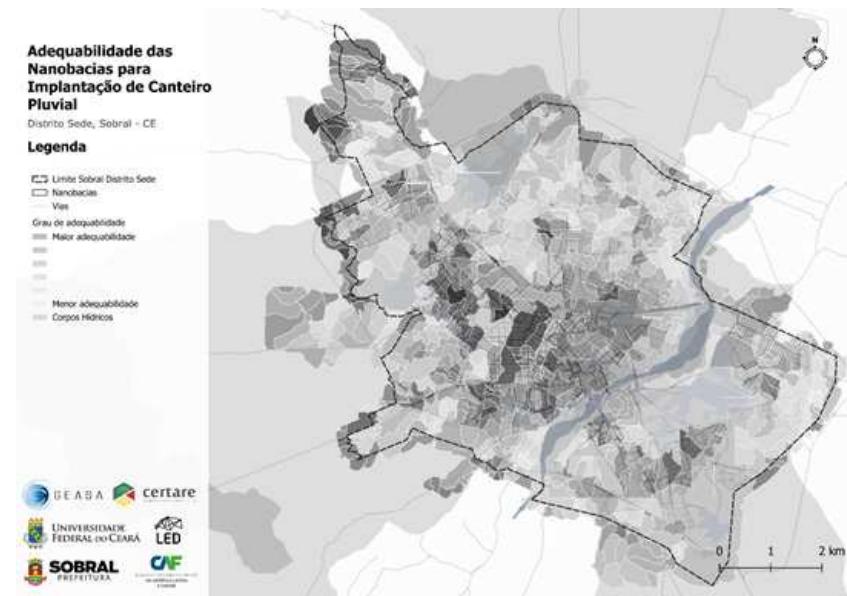
**Figura 82.** Mapa de adequabilidade de biovaletas para o distrito-sede de Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024.

	Peso de Cada Camada	Jardim de chuva	Canteiro pluvial	Biovaletas	Alagados Construídos
Camada 01	% de impermeabilização de Nascentes	25%	25%	25%	0%
Camada 02	% de impermeabilização das nanobacias	25%	50%	50%	0%
Camada 03	% de áreas desprotegidas de cursos hidricos	25%	25%	10%	50%
Camada 04	Carta de hipsometria	25%	25%	0%	0%
Camada 06	Carta de concavidade	25%	50%	50%	0%
Camada 07	Carta de declividade	50%	50%	50%	0%
Camada 08	índice de Segurança Hídrica (ISH)	25%	25%	0%	50%
Camada 09	Menor distância entre áreas verde (parques e praças)	25%	50%	50%	0

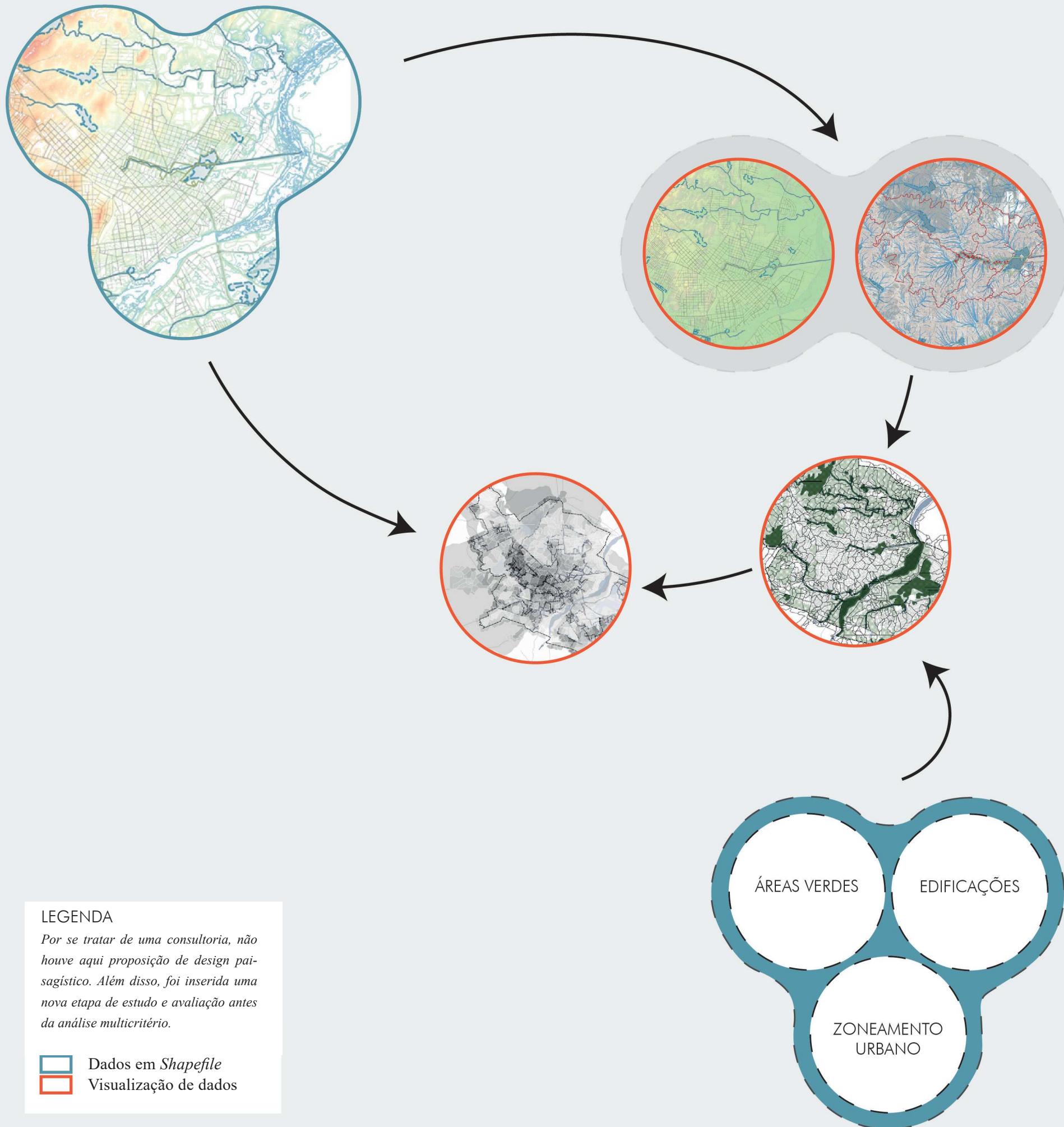
**Figura 79.** Tabela de indicadores para criação de mapas de adequabilidade para o distrito-sede de Sobral e pesos por critério. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024.



**Figura 81.** Mapa de adequabilidade de alagados para o distrito-sede de Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024.



**Figura 83.** Mapa de adequabilidade de canteiro pluvial para o distrito-sede de Sobral. Fonte: Elaborada pelo consórcio, 2024.



**Figura 84.** Ilustração das diferentes etapas do algoritmo Tucunaré adaptada ao estudo de caso do distrito-sede de Sobral. Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

# CAPÍTULO 7

# CONCLUSÃO

Dados os diferentes temas e estudos de caso apresentados, foi separado um capítulo para discutir cada resultado obtido por meio dessa dissertação. Além disso, os principais entendimentos construídos foram sintetizados nas figuras e nas tabelas que ocupam uma página inteira dessa dissertação (“painéis”) ao longo do trabalho.

**O Capítulo 3 trata do objetivo específico 1, discutir teoricamente a natureza como infraestrutura.** O tema da resiliência é inicialmente explorado como base que justifica as SBN, sua compreensão é fundamentada para os entendimentos subsequentes.

O entendimento das SBN e, consequentemente, das IeA como ferramentas de resiliência urbana a inundações foi alcançado e resumido/ilustrado nas Tabelas 1, 2 e 3, e nas Figuras 22 e 26. A Tabela 1 define os principais conceitos que englobam a resiliência. A Tabela 2 apresenta as principais definições de natureza como infraestrutura, enquanto a Figura 22 ilustra como essas diferentes formas de natureza se inter-relacionam. Por fim, a Tabela 3 define os diferentes tipos de IeA, e a Figura 26 traz uma ilustração exemplificando esses tipos.

O Capítulo 3 concluiu com essa definição das infraestruturas que foram abordadas ao longo dessa dissertação como ferramentas de resiliência urbana a inundações. Como discussão relevante, vale ressaltar que as IeA por si só tratam de um aspecto específico da resiliência urbana como um todo e, como tal, possuem uma eficácia limitada. Quando propostas de forma isolada, apenas para o cumprimento de metas institucionais, elas adquirem um caráter utópico, e podem gerar frustrações.

**O Capítulo 4 apresenta o outro componente teórico dessa dissertação:** a modelagem da informação aplicada à paisagem. Tratando, inicialmente, metodologias consagradas de projeto da paisagem, com destaque para metodologias que estimulam uma relação maior entre a paisagem artificial e a paisagem natural. Em seguida, foi realizada a Revisão Sistemática da Literatura do LIM, que culmina na Tabela 4, que traz as referências consideradas pertinentes ao tema e que foram definidoras das 4 características do LIM apontadas na página 50.

Aqui houve uma mudança de perspectiva, o LIM, antes compreendido enquanto metodologia de planejamento da paisagem, passa a ser enquadrado enquanto uma ferramenta, a qual tem o potencial de modificar as metodologias tradicionais, mas que, por si só, não se trata de uma. Por fim, na figura 34, é apresentada uma sequência padrão de ações para uma metodologia de projeto paisagístico simplificado e o LIM é situado como ferramenta dentro do mesmo.

Unindo os dois capítulos mencionados, o LIM foi proposto como abordagem promissora para tratar as problemáticas urbanas necessária ao projeto da paisagem para cidades mais resilientes a inundações urbanas. Por se tratar de uma ferramenta inteligente que tem a capacidade de trabalhar com dados em constante atualização, ele tem a potencialidade de ser uma ferramenta mais adaptável aos problemas urbanos do mundo contemporâneo, ou seja, tem a potencialidade de tornar as cidades mais resilientes.

Tendo em vista o objetivo específico 2, investigar abordagens metodológicas para o planejamento da paisagem com foco na resiliência, o Capítulo 4 traz uma abordagem teórica, comprovando, por meio de referências acadêmicas, que o LIM possui essa potencialidade de resiliência. Surgiu então um vácuo de oportunidade para os Capítulos

5 e 6, os quais buscam exemplificar essa potencialidade em estudos de caso brasileiros, para uma resiliência urbana local.

O Capítulo 5 traz a ferramenta Tucunaré, que foi desenvolvida ao longo da escrita da dissertação e implementada em diferentes estudos de caso, aqui ela é abordada na Bacia do Mata-Fome na cidade de Belém do Pará. A ferramenta é ilustrada por meio de um mapa mental apresentado na Figura 37, que posteriormente é repetido com adequações para cada estudo de caso trabalhado: o de Belém do Pará, trazido na Figura 56. Nesse Capítulo, é abordado um caso exemplar do uso do algoritmo: ele inicialmente traz o diagnóstico topográfico e hidrográfico de uma microbacia, possibilitado por meio do algoritmo paramétrico desenvolvido, para em seguida ser feita uma análise multicritério finalizada com uma proposição de vias mais suscetíveis ao recebimento de IeAs, especificamente: jardins de chuva ou biovaletas (soluções lineares). Essa análise é o ponto de partida para um desenho paisagístico que, no caso de Belém, traz a proposição de jardins de chuva e de um sistema de alagados naturais para tratar a subida da maré, questão particular da região.

Aqui entende-se que a ferramenta atinge o objetivo almejado, dentro da questão específica do uso de SBN para a resiliência a inundações, mas, como na conclusão trazida no Capítulo 2, essa solução tem limitações referentes ao tema específico abordado, sendo a resiliência urbana uma característica mais complexa do que apenas a previsão de SBN. Em uma situação real, por exemplo, a disposição inadequada de resíduos sólidos (lixo na via pública) poderia colocar a função das ferramentas a perder, por meio do entopimento das superfícies de infiltração da água da chuva. Para comprovar sua usabilidade e compreender se é capaz de se adaptar a diferentes situações, a ferramenta foi utilizada em diferentes territórios. O Capítulo 6 tem esse intuito, como o título já expõe, de validar a ferramenta que foi desenvolvida. Para tal, são apresentadas 3 diferentes experimentações em sua ordem cronológica ao longo dos últimos dois anos.

Primeiramente, são apresentados os *workshops sobre LIM* que foram ministrados para diferentes grupos de profissionais e estudantes em contextos acadêmicos nacionais e internacionais. Aqui, a conclusão considerada mais relevante foi o entendimento de que sim, outros profissionais são capazes de utilizar e entender o algoritmo com sua metodologia e resultados possíveis. Contudo, a capacidade de utilização por parte de profissionais não treinados na ferramenta é limitada, tendo sido necessária uma simplificação para que o algoritmo pudesse ser ministrado em *workshops* de poucas horas.

A segunda experimentação traz o **estudo de caso do Grande Bom Jardim, na cidade de Fortaleza**. Aqui, o Tucunaré foi quase completamente replicado, houve a incorporação de novos dados que geraram indicadores e, consequentemente, influenciaram na escolha da intervenção final (Figura 70). Nesse território também ficou claro o peso que decisões políticas podem ter dentro de um projeto de urbanismo sustentável, já que, por questões situacionais da gestão pública, a proposição inicial dos pesquisadores não foi seguida. Essa é uma variável que só pode ser incorporada quando a ferramenta é testada em um caso real, daí a importância do estudo.

O terceiro estudo de caso apresenta uma consultoria ambiental para os **jardins filtrantes da cidade de Sobral**, uma intervenção exis-

tente. Aqui o Tucunaré foi incorporado no diagnóstico inicial da zona urbana e, posteriormente, na possibilidade da replicabilidade de IeAs para a cidade (Figura 84). O algoritmo foi utilizado de diferentes formas, não mantendo sua metodologia inicial para se adaptar ao que foi demandado pelo município e que a equipe de trabalho achou mais adequado como proposta. Esse estudo trouxe uma nova escala: a zona urbana de uma cidade muito maior que nas experimentações apresentadas anteriormente, comprovando sua flexibilidade perante diferentes cenários. Além disso, ele reitera as novas questões apresentadas no caso de Fortaleza: a importância do fator político nesses trabalhos e a necessidade do levantamento de indicadores para análise antes, durante e após a intervenção.

Tendo em vista tudo o que foi apresentado até o momento, retorna-se ao objetivo principal desse trabalho: **analisar como as Soluções Baseadas na Natureza (SBN) podem atuar como agentes de resiliência urbana frente às inundações, considerando as características geográficas, sociais e culturais de cada território. Além disso, busca-se explorar a Modelagem da Informação da Paisagem (LIM) como uma ferramenta capaz de responder às demandas globais sem desconsiderar as particularidades locais.**

O primeiro trecho do objetivo traz a análise das SBN como soluções para atender a questões locais, um aspecto que, além de ser abordado teoricamente no Capítulo 3, é testado de forma prática nos diversos estudos de caso, realizados em diferentes biomas brasileiros. A resiliência urbana é definida ao longo do texto, e, ao final do item 3.1.1, a conclusão sobre o conceito de resiliência urbana frente às inundações é apresentada. Vale ressaltar que essa definição trata da resiliência de forma holística, com base principalmente na análise de textos e artigos acadêmicos. O conceito de resiliência à inundaçāo é discutido, mas é nos capítulos subsequentes, por meio dos estudos de caso, que essa definição se torna tangível e materializada. A comparação entre o conceito teórico e as realidades práticas evidencia as múltiplas relações entre diferentes escalas que afetam a resiliência urbana como um todo, além da escala específica da resiliência à inundações em microbacias. Existe, por exemplo, a escala de influência social, política e econômica de uma área, fatores que se inter-relacionam e devem ser considerados ao planejar SBN para resiliência.

A partir disso, é importante reiterar que existe abertura para uma maior particularização dos projetos, que tendem a trazer soluções generalizantes. Optou-se como recorte o estudo de SBN voltadas à resiliência a inundações, sendo apresentadas como IeAs para um entendimento mais focado no tema. Como segundo aspecto desse trabalho, o LIM é conceituado teoricamente no Capítulo 4 e testado ao longo dos diferentes estudos de caso como uma ferramenta promissora na particularização dos usos das IeAs, por sua característica paramétrica e, consequentemente, adaptativa.

**Com base no que foi apresentado, pode-se concluir que as SBN e o LIM são ferramentas promissoras para promover a resiliência urbana às inundações, adaptando-se às especificidades de cada território. Contudo, sua eficácia depende de uma abordagem integrada, que considere fatores políticos, sociais e ambientais. Assim, este trabalho contribui para o avanço teórico e prático no uso dessas ferramentas, evidenciando sua relevância para o planejamento paisagístico e para a construção de cidades mais resilientes e adaptativas.**

## Tópico 7.1

# CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir deste ponto, trago o texto em primeira pessoa, pois abordarei minhas percepções pessoais e expectativas para o futuro deste trabalho. Também me permito abandonar um pouco do rigor técnico empregado até agora. Abaixo estão minhas opiniões e reflexões pessoais.

Espero que esta pesquisa tenha trazido contribuições significativas às diferentes instituições pelas quais passou. Entendo que, sem ela, projetos e estudos relacionados estariam menos completos, considerando sua positiva contribuição. Por tratar de ferramentas inovadoras, como as Soluções Baseadas na Natureza (SBN) dentro da prática da paisagem, e tecnologias pouco exploradas por paisagistas, como a modelagem da informação, acredito que ainda há espaço para maior consolidação desses temas nos diversos órgãos. Nesse sentido, os convites para *workshops* foram aceitos como um indicativo do interesse da academia e das instituições em integrar esses temas às suas práticas. No entanto, essas ferramentas, ao menos nos cursos de arquitetura e urbanismo das universidades mencionadas, ainda são exploradas apenas em laboratórios e pesquisas de pós-graduação, o que limita sua disseminação e aprendizado.

Como, então, seria possível incorporar as SBN e a parametrização das metodologias de projeto aos órgãos que lidam com projetos urbanos nas cidades brasileiras? Tenho discutido com atores institucionais sobre a criação de catálogos nacionais de detalhamento e manutenção de SBN, um avanço positivo diante da ausência de normativas nacionais. No entanto, catálogos generalizantes dificilmente contemplariam a complexidade dos biomas brasileiros e das especificidades urbanas, aspectos evidenciados nesse trabalho.

Ainda assim, essa abordagem também tem suas limitações. Assim como as SBN, quando utilizadas isoladamente e de forma aleatória, apresentam benefícios restritos, o uso de um algoritmo como o Tucunaré também desconsidera aspectos essenciais da resiliência urbana, como as dimensões econômica e social. Essa lacuna é perceptível ao comparar o caso de Belém do Pará, em que o algoritmo foi aplicado de forma isolada, com o caso do Bom Jardim, que integrou uma série de outras complexidades ao ser parte de um projeto maior de planejamento urbano conduzido pelo órgão municipal de Fortaleza.

E o que fica para o futuro desta pesquisa? É encorajador saber que ela já inspira outros pesquisadores no LED, onde foi originada, e potencialmente em outras universidades do país. Com novos olhares e problemas distintos, essa pesquisa pode se expandir e se especializar ao passar pelas mãos de outros pesquisadores. O LIM tem o potencial de abordar inúmeras questões da paisagem urbana, especialmente com o avanço do aprendizado de máquina, tornando-se ainda mais autônomo e eficiente. Acredito que o Tucunaré já cumpriu seu objetivo. Ele pode ser aprimorado para produzir resultados mais precisos, mas, dentro de sua proposta original, não deve incorporar novas questões. Para isso, seria necessário o desenvolvimento de um novo algoritmo.

No que diz respeito ao futuro da pesquisa em SBN, acredito que este é um campo de estudo infinito, tanto para mim quanto para outros pesquisadores. Pretendo continuar investigando suas diversas facetas, principalmente acompanhando a instalação e manutenção de SBN em diferentes cenários. Neste trabalho, utilizo o termo “natureza como infraestrutura” porque acredito que a natureza sempre foi e sempre será infraestrutura para a humanidade, independentemente de termos como SBN, IeA ou MpM serem transitórios. A emergência climática continuará sendo um desafio por muitos anos, e os cursos d’água continuarão transformando as ocupações humanas, como as entidades mutáveis que são. Assim, o estudo da paisagem será sempre necessário, e sempre haverá novas perspectivas a serem exploradas.

“O que é pois, ser curioso? Fundamentalmente é um esforço para ultrapassar o alcance humano e fazer de si um ser sublime. (...) Não subsiste, então, para o curioso, senão esta vida perpetuamente inquieta e esta felicidade sempre adiada.”

(Besse, 2006, p. 12)

# CAPÍTULO 8

# BIBLIOGRAFIA

ABDOLLAHZADEH, N.; BILORIA, N. Urban microclimate and energy consumption: A multi-objective parametric urban design approach for dense subtropical cities. **Frontiers of Architectural Research**, fev. 2022.

ABRAMOVAY, R. **Infraestrutura para o desenvolvimento sustentável da Amazônia**. [s.l.] Editora Elefante, 2022.

ALVES, S. *et al.* Investigação de Potenciais de Constituição de Paisagens Funcionais na Área de Expansão de Belém-Pará. XX ENANPUR, 2023, Belém. **Anais do XX ENANPUR**. 2023a.

ALVES, S. *et al.* Investigação de Potenciais de Constituição de Paisagens Funcionais na Área de Expansão de Belém. **P@ranoá**, n. 34, p. 1–27, 17 nov. 2023b.

BADIU, D. L., NITA, A., IOJA, C. I., & NITA, M. R. Disentangling the connections: A network analysis of approaches to urban green infrastructure. **Urban Forestry & Urban Greening**, 41, 211–220, 2019.

BAEZA, A. *et al.* Operationalizing the feedback between institutional decision-making, socio-political infrastructure, and environmental risk in urban vulnerability analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 241, p. 407–417, jul. 2019.

BARREIRA *et al.* **Plano Integrado de Regularização Fundiária da ZEIS do Poço da Draga: Caderno de Diagnóstico Socioeconômico, Físico-Ambiental, Urbanístico e Fundiário**. Fortaleza; 2019.

BEIRÃO, J. CityMaker: Designing Grammars for Urban Design. A+BE: **Architecture and the Built Environment**, 2, 2012.

BENEDICT, M. A.; MCMAHON, E.; CONSERVATION FUND (ARLINGTON, VA). **Green infrastructure : linking landscapes and communities**. Washington, Dc: Island Press, 2006.

BORKOWSKI, A. S.; WYSZOMIRSKI, M. LANDSCAPE INFORMATION MODELLING: AN IMPORTANT ASPECT OF BIM MODELLING, EXAMPLES OF CUBATURE, INFRASTRUCTURE, AND PLANNING PROJECTS. **Geomatics, Landmanagement and Landscape**, v. 1, p. 7–22, 2021.

BESSE, J.-M. **Ver a terra**. 1. ed. São Paulo: Perspectiva, 2006.

BRASIL. *Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001*. Regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 11 jul. 2001. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/LEIS\\_2001/L10257.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10257.htm). Acesso em: 26 dez. 2024.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Carta Brasileira para Cidades Inteligentes**. [s.l.] 2020.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Estabelece os padrões de qualidade da água para consumo humano e seu controle e vigilância, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 7 maio 2021. Disponível em: [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888\\_04\\_05\\_2021.html](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_04_05_2021.html). Acesso em: 10 dez. 2024.

BRASIL. Agência GOV. **Conheça as seis cidades selecionadas pelo Projeto Cidade Presente**. Disponível em: <<https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202309/conheca-as-seis-cidades-selecionadas-pelo-projeto-cidade-presente>>. Acesso em: 19 mar. 2024.

BUSH, J.; DOYON, A. Building urban resilience with nature-based solutions: How can urban planning contribute? **Cities**, v. 95, p. 102483, dez. 2019.

CANTRELL, B. E.; HOLZMAN, J. **Responsive Landscapes**. [s.l.] Routledge, 2015.

CANTRELL, B.; MARTIN, L. J.; ELLIS, E. C. Designing Autonomy: Opportunities for New Wildness in the Anthropocene. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 32, n. 3, p. 156–166, mar. 2017.

CANTRELL, B.; MEKIES, A. **Codify**. [s.l.] Routledge, 2018.

CARVALHO, T. *et al.*; Modelagem da Informação Aplicada à Paisagem: O uso do LIM no caso da Bacia do Mata-Fome em Belém do Pará. XX ENANPUR, 2023, Belém. **Anais do XX ENANPUR**. 2023a.

CARVALHO, T. *et al.* Landscape Information Modeling for vulnerable landscape recovery: the case of Bom Jardim in Fortaleza, Ceará, Brazil. XXVII SIGraDI Congress, 2023, Montevideu. **Proceedings from XXVII SIGraDI Congress**. 2023b.

CHEN, Y.; ZHENG, L.; YAN, L. Research on the intelligent generation of the spatial form of the island city historic district based on parameterization: taking Macau Taipa Village as an example. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v. 23, n. 3, p. 1094–1125, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/13467581.2023.2257274>.

CLIMATE CENTRAL. climate central org, 2022. **Coastal risk screening tool**. Disponível em: <[https://coastal.climatecentral.org/map/13/48.4471/-1.4341/?theme=sea\\_level\\_rise&map\\_type=year&basemap=roadmap&contiguous=true&elevation\\_model=best\\_available&forecast\\_year=2050&pathway=rcp45&percentile=p50&refresh=true&return\\_level=return\\_level\\_1&rl\\_model=gtsr&slr\\_model=kopp\\_2014](https://coastal.climatecentral.org/map/13/48.4471/-1.4341/?theme=sea_level_rise&map_type=year&basemap=roadmap&contiguous=true&elevation_model=best_available&forecast_year=2050&pathway=rcp45&percentile=p50&refresh=true&return_level=return_level_1&rl_model=gtsr&slr_model=kopp_2014)>. Acesso em: 11 ago. 2022.

COHEN-SHACHAM, E. *et al.* Core principles for successfully implementing and upscaling Nature-based Solutions. **Environmental Science & Policy**, v. 98, p. 20–29, ago. 2019.

COLUCCI, A. The potential of periurban areas for the resilience of metropolitan region. **Tema. Journal of Land Use, Mobility and Environment**, 8 (Special Issue ECCA 2015), 103-122, 2015.

CORMIER, N. S.; PELLEGRINO, P. R. M. Infraestrutura verde: uma estratégia paisagística para a água urbana. **Paisagem e Ambiente**, [S. l.], n. 25, p. 127-142, 2008. DOI: 10.11606/issn.2359-5361.v0i25p127-142. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/paam/article/view/105962>. Acesso em: 21 set. 2023.

CUTTER, S. L. *et al.* Flash Flood Risk and the Paradox of Urban Development. **Natural Hazards Review**, v. 19, n. 1, p. 05017005, fev. 2018.

EARLE, T. R.; BROWNLEA, A. A.; ROSE, C. W. Information for landscape modelling: A catchment case study. **Landscape Planning**, v. 5, n. 4, p. 281–309, fev. 1979.

EASTMAN, C. *et al.* **BIM Handbook**. 15 fev. 2008.

ER-RETY, H. *et al.* Enhancing urban design performance through parametric analysis: Insights from the Green City of Ben Guerir, Morocco. **Journal of Urban Management**, 15 nov. 2024.

ERVIN, S. M. Digital landscape modeling and visualization: a research agenda. **Landscape and Urban Planning**, v. 54, n. 1-4, p. 49–62, maio 2001.

ESCOBEDO, F. J. *et al.* Urban forests, ecosystem services, green infrastructure and nature-based solutions: Nexus or evolving metaphors? **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 37, n. 1, p. 3–12, jan. 2019.

**EUROPEAN COMMISSION (EC).** Horizon 2020 expert group on Nature-based solutions and re-naturing cities. Final Report: Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities. Brussels: European Commission, 2015. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/fb117980-d5aa-46df-8edc-af367cddc202>. Acesso em: 13 jun. 2021.

**EUROPEAN COMMISSION, Directorate-General for Research and Innovation.** HERZOG, C.; FREITAS, T.; WIEDMAN, G. (Ed.). Soluções baseadas na natureza e os desafios da água: acelerando a transição para cidades mais sustentáveis. Publications Office of the European Union, 2022. Disponível em: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/850594>.

FOLKE, C. Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. **Global Environmental Change**, v. 16, n. 3, p. 253–267, ago. 2006.

FORMAN, R. T. T. **Urban ecology: science of cities**. New York: Cambridge University Press, 2014.

FORTALEZA. Decreto Municipal n.º 13.827, de 14 de junho de 2016. **Dispõe sobre a instituição da Comissão de Proposição e Acompanhamento da Regulamentação e Implantação das Zonas Especiais de Interesse Social – ZEIS, e dá outras providências**. Diário Oficial do Município de Fortaleza, Fortaleza, n.º 15.801, 2016.

FORTALEZA. Prefeitura de Fortaleza. **Caminhos Verdes e Azuis: Prefeitura de Fortaleza recebe primeira visita técnica do Ministério da Cidades e da GIZ**. Disponível em: <<https://www.fortaleza.ce.gov.br/noticias/caminhos-verdes-e-azuis-prefeitura-de-fortaleza-recebe-primeira-visita-tecnica-do-ministerio-da-cidades-e-da-giz>>. Acesso em: 19 mar. 2024.

FREITAS, C. & LIMA, M. Modelagem Paramétrica e os Limites dos Mecanismos Tradicionais de Regulação da Forma Urbana. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, 4, 117-138, 2016.

**G1. Comportas manuais devem reduzir alagamentos em Belém.** 2013. Disponível em: <https://g1.globo.com/pa/para/noticia/2013/02/comportas-manuais-devem-reduzir-alagamentos-em-belem.html>. Acesso em: 7 dez. 2024.

GOBEAWAN *et al.* IFC-CENTRIC VEGETATION MODELLING FOR BIM. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. VIII-4/W2-2021, p. 91–98, 7 out. 2021.

GONÇALVES, C.; BORGES, M.; MARQUES, J. Resiliência urbana pró-Sustentabilidade e planeamento sob incerteza. **CIDADES, Comunidades e Territórios**, n. Sp21, 2021.

GONZÁLEZ, L. E. *et al.* Resiliencia urbana frente a inundaciones fluviales en Chile: experiencias de San Fernando y Los Ángeles. **Revista de urbanismo**, n. 43, p. 131–150, 1 dez. 2020.

GRIFFITHS, J. *et al.* Interpretation and application of Sponge City guidelines in China. **Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences**, v. 378, n. 2168, 3 abr. 2020.

GUNDERSON, L. H.; HOLLING, C. S. **Panarchy: understanding transformations in human and natural systems**. Washington, Dc: Island Press, 2002.

GUNDERSON, L. H.; ALLEN, C. R.; HOLLING, C. S. **Foundations of ecological resilience**. Washington, Dc: Island Press, 2010.

GUO, S. *et al.* Study on Landscape Architecture Model Design Based on Big Data Intelligence. **Big Data Research**, v. 25, p. 100219, jul. 2021.

HAASE, D. Reflections about blue ecosystem services in cities. **Sustainability of Water Quality and Ecology**, v. 5, p. 77–83, mar. 2015.

HADAR, L. *et al.* Envisioning future landscapes: A data-based visualization model for ecosystems under alternative management scenarios. **Landscape and Urban Planning**, v. 215, p. 104214, nov. 2021.

HAMILTON, W. A. H. Resilience and the city: the water sector. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Urban Design and Planning**, v. 162, n. 3, p. 109–121, set. 2009.

HANSEN, R.; PAULEIT, S. From Multifunctionality to Multiple Ecosystem Services? A Conceptual Framework for Multifunctionality in Green Infrastructure Planning for Urban Areas. **AMBIÓ**, v. 43, n. 4, p. 516–529, 17 abr. 2014.

HERZOG, C. P.; ROSA, L. Z. Infraestrutura Verde: Sustentabilidade e Resiliência para a Paisagem Urbana. **Revista LABVERDE**, v. 1, p. 1-24, 2010.

HERZOG, C.; FREITAS, T.; WIEDMAN, G.. INTRODUÇÃO: RESPONDENDO AOS DESAFIOS DAS ÁGUAS E SANEAMENTO COM SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA. In: European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Herzog, C., Freitas, T., Wiedman, G. **Soluções baseadas na natureza e os desafios da água : acelerando a transição para cidades mais sustentáveis**. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/850594>. 2022

HOLLING, C. S. Resilience and Stability of Ecological Systems. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 4, n. 1, p. 1–23, nov. 1973

HOLLING, C. S. Engineering resilience versus ecological resilience. In: SCHULZE, P. C. (ed.). **Engineering within ecological constraints**. Washington, D.C.: National Academy Press, 1996.

HOLZMAN J. & CANTRELL, B. E. **Responsive Landscapes: strategies for responsive technologies in landscape architecture**. London: Routledge, 2015.

HOU, J. et al. Spatial simulation of the ecological processes of stormwater for sponge cities. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 574–583, fev. 2019.

HOUGH, M. **Cities and natural process : a basis for sustainability**. London: Routledge, 2006.

HUGHES, D. et al. The influence of 4D landscape visualisation on attitudes to reservoir renaturalisation. **Landscape and Urban Planning**, v. 221, p. 104372, maio 2022.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

IBGE, **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**, Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2018.

IFT. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. In: CARVALHO, C.S., MACEDO, E.S., OGURA, A.T. (Orgs.). Brasília: Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IFT, 2007. Disponível em: <http://planodiretor.mprs.mp.br/arquivos/mapeamento.pdf>.

JELLICOE, G.; JELLICOE, S. **The landscape of man : shaping the environment from prehistory to the present day**. London: Thames And Hudson, 1995.

JUSUF, S. et al. Integrated modeling of CityGML and IFC for city/neighborhood development for urban microclimates analysis. **Energy Procedia**, v. 122, p. 145–150, set. 2017.

LAFORTEZZA, R. et al. Nature-based solutions for resilient landscapes and cities. **Environmental Research**, v. 165, p. 431–441, ago. 2018.

LAMOND, J. E.; ROSE, C. B.; BOOTH, C. A. Evidence for improved urban flood resilience by sustainable drainage retrofit. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Urban Design and Planning**, v. 168, n. 2, p. 101–111, abr. 2015.

LANGE, E. The limits of realism: perceptions of virtual landscapes. **Landscape and Urban Planning**, v. 54, n. 1-4, p. 163–182, maio 2001.

LANGE, E. 99 volumes later: We can visualise. Now what? **Landscape and Urban Planning**, v. 100, n. 4, p. 403–406, abr. 2011.

LI, M. et al. A room with a view: Automatic assessment of window views for high-rise high-density areas using City Information Models and deep transfer learning. **Landscape and Urban Planning**, v. 226, p. 104505, out. 2022.

LIAO, K.-H. A Theory on Urban Resilience to Floods--A Basis for Alternative Planning Practices. **Ecology and Society**, v. 17, n. 4, 2012.

LIMA, M. Q. C. **Ver a Cidade. Modelagem da Informação para Regulação de Assentamentos Informais**. Fortaleza, CE: Universidade Federal do Ceará, 2017.

MA, Y. et al. Seeing the invisible: From imagined to virtual urban landscapes. **Cities**, v. 98, p. 102559, mar. 2020.

MARINHA DO BRASIL. **Tábua de Marés 2023 PORTO DE BELÉM (ESTADO DO PARÁ)**. [S. l.], 2022. Disponível em: [https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/dados\\_de\\_mare/07-porto\\_de\\_belem\\_tabua\\_2023.pdf](https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/dados_de_mare/07-porto_de_belem_tabua_2023.pdf). Acesso em: 12 dez. 2022.

MARQUES, T. H. N. et al. Soluções baseadas na natureza: conceituação, aplicabilidade e complexidade no contexto latino-americano, casos do Brasil e Peru. **Revista LABVERDE**, v. 11, n. 1, p. 12–49, 14 dez. 2021.

MCHARG, I. **Design with nature**. New York: John Wiley, 1995.

MEEROW, S.; NEWELL, J. P.; STULTS, M. Defining urban resilience: A review. **Landscape and Urban Planning**, v. 147, p. 38–49, mar. 2016a.

MEEROW, S.; NEWELL, J. P. Urban resilience for whom, what, when, where, and why? **Urban Geography**, v. 40, n. 3, p. 1–21, 12 jul. 2016b.

MOURA, N. B. & PELLEGRINO, P. & MARTINS, J. R. & RAVIOLI B. & MOREIRA, E. Intelligent Landscapes: Application of parametric modeling for a new generation of flood risk management reservoirs in São Paulo city, Brazil. **DISEGNARECON**. 11. 11.1-11.15. 2018.

MOURA, Newton Célio Becker de. **Biorretenção: tecnologia ambiental urbana para manejo das águas de chuva.** 2014. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16135/tde-30052014-104153/>. Acesso em: 18 out. 2023.

MUÑOZ-ERICKSON, T. A. *et al.* Beyond bouncing back? Comparing and contesting urban resilience frames in US and Latin American contexts. **Landscape and Urban Planning**, v. 214, p. 104173, out. 2021.

NA, Sungjin. Case analysis and applicability review of parametric design in landscape architectural design. **Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture**, v. 49, n. 2, p. 1-16, 2021. DOI: <https://doi.org/10.9715/KILA.2021.49.2.001>.

NOVOTNY, V.; AHERN, J.; BROWN, P. **Water Centric Sustainable Communities.** [s.l.] John Wiley & Sons, 2010.

ONU. **Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres 2015-2030.** Sendai, Japão: Nações Unidas, 2015.

PAPA, R., GALDERISI, A., VIGO MAJELLO M.C., SARETTA E. Smart and resilient cities. A systemic approach for developing cross-sectoral strategies in the face of climate change. **Tema. Journal of Land Use, Mobility and Environment**, 8 (1), 19-49, 2015.

PASSOS FILHO, José Aderson Araújo. **Aprender, Simplificar, Acelerar: machine learning para a acessibilização de análises em escala urbana.** 2021, 152 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo e Design) - Centro de Tecnologia, Universidade federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

PBMC. **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas.** Marengo, J. A.; Scarano, F. R. (Eds.). Rio de Janeiro: PBMC, COPPE-UFRJ, 2016. 184 p. ISBN 978-85-285-0345-6.

PELLEGRINO P. & ALENCAR J. **SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA PARA MANEJO SUSTENTÁVEL DAS ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS.** In: European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Herzog, C., Freitas, T., Wiedman, G. **Soluções baseadas na natureza e os desafios da água : acelerando a transição para cidades mais sustentáveis.** Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/850594>. 72-81. 2022.

PENTTILÄ, H. Describing the changes in architectural information technology to understand design complexity and free-form architectural expression. **Journal of Information Technology in Construction (ITcon)**, v. 11, n. 29, p. 395–408, 12 jun. 2006.

PICKETT, S. T. A.; CADENASSO, M. L.; GROVE, J. M. Resilient cities: meaning, models, and metaphor for integrating the ecological, socio-economic, and planning realms. **Landscape and Urban Planning**, v. 69, n. 4, p. 369–384, out. 2004.

PINHEIRO, M. B.; BANDEIRA, N.; CODAS, R.; ASSUMPÇÃO, N.; BECKER, N.; CARVALHO, T.; ITALIA, M. **Jardim Filtrantes de Sobral.** Caracas: CAF, 2024. Disponível em: <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/2358>.

RAI, A. *et al.* A novel computational green infrastructure design framework for hydrologic and human benefits. **Environmental Modelling & Software**, v. 118, p. 252–261, ago. 2019.

RASOULKHANI, K. *et al.* Resilience planning in hazards-humans-infrastructure nexus: A multi-agent simulation for exploratory assessment of coastal water supply infrastructure adaptation to sea-level rise. **Environmental Modelling & Software**, v. 125, p. 104636, 1 mar. 2020.

REINHARD, M. P. **SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA FORNECEM, PROMOVEM E RESTAURAM SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS.** In: European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Herzog, C., Freitas, T., Wiedman, G. (2022). **Soluções baseadas na natureza e os desafios da água: acelerando a transição para cidades mais sustentáveis.** Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/850594>. 29-37.

ROUSE, D. C. **Green Infrastructure: a landscape approach.** Chicago, Il: American Planning Association, 2013.

SANDRE, A. A.; PELLEGRINO, P. R. M. Modelagem da Informação da Paisagem. Pós. **Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP**, v. 27, n. 51, p. e168291, 8 jan. 2021.

SANTOS, M. **Espaço & método.** [s.l.] São Paulo Nobel, 1988.

SANTOS, M.; DENISE, E. **Metamorfooses do espaço habitado: Fundamentos teóricos e metodológicos da geografia.** São Paulo: Hucitec, 1991.

SCHELLER, R. Landscape Modeling. **Reference Module in Life Sciences**, 2017.

SHARIFI, A. *et al.* Application of artificial intelligence in digital twin models for stormwater infrastructure systems in smart cities. **Advanced engineering informatics**, v. 61, p. 102485–102485, 1 ago. 2024.

SILVA, F. O. E., PALÁCIO, F. F. R., CAMPOS, J N. B. Equação de chuvas para Fortaleza-CE com dados do pluviógrafo da UFC. **Revista DAE**, v. 192, 2013.

SILVA, M. J.; LUZ, L. M.. Uso do solo e degradação ambiental: Estudo de caso da bacia do Mata Fome em Belém, Pará. **Grajaú: Revista InteREspaço**, v. 2, n. 7, p. 162-178, 2016.

SIMON, Herbert A., **The sciences of the artificial**. 3rd ed. Cambridge, Mass: MIT Press, 1996.

SMIT, B.; WANDEL, J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. **Global Environmental Change**, v. 16, n. 3, p. 282–292, 2006.

SOUSA, C. E. M. **Modelando a percepção: o ambiente do patrimônio cultural edificado na regulação da forma urbana**. 2018. 74 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo e Design) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

SOUZA, Rodrigo O. R. de M. et al. Equações de chuvas intensas para o Estado do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, UAEA/UFCG, v. 16, n. 9, p. 999-1005, 15 jun. 2012.

SOWIŃSKA-ŚWIERKOSZ, B.; GARCÍA, J. A new evaluation framework for nature-based solutions (NBS) projects based on the application of performance questions and indicators approach. **Science of The Total Environment**, v. 787, p. 147615, set. 2021.

SPIRN, A. W. **The Granite Garden**. [s.l.] Basic Books, 1995.

SPIRN, A. W. **The language of landscape**. New Haven, Conn.: Yale University Press, 2000.

STEINITZ, C. A Framework for Theory Applicable to the Education of Landscape Architects (and Other Environmental Design Professionals). **Landscape Journal**, v. 9, n. 2, p. 136–143, 1990.

STEINITZ, C. **A Framework for Geodesign**. [s.l.] ESRI Press, 2012.

THE ROCKEFELLER FOUNDATION. **City Resilience Framework**. London; 2015.

UNDRR (UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION). **How to make cities more resilient: a handbook for local government leaders**. Geneva: UNDRR, 2012. Disponível em: <https://www.undrr.org/publication/how-make-cities-more-resilient-handbook-local-government-leaders>.

VALE, L. J.; CAMPANELLA, T. J. **The Resilient City**. [s.l.] Oxford University Press, 2005.

VERÓL, A. P. et al. **Requalificação fluvial em rios urbanos: uma aplicação de soluções baseadas na natureza para melhoria ambiental e urbana**. In: HERZOG, C.; FREITAS, T.; WIEDMAN, G. (Ed.). Soluções baseadas na natureza e os desafios da água: acelerando a transição para cidades mais sustentáveis. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. Publications Office of the European Union, 2022. p. 57-71. Disponível em: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/850594>.

VOJINOVIC. **Flood risk: the holistic perspective: from integrated to interactive planning for flood resilience**. London, Uk: Iwa Publishing, 2015.

WALKER, B.; SALT, D. **Resilience thinking: sustaining ecosystems and people in a changing world**. Washington: Island Press, 2006.

WANGHE, K. et al. Gravity model toolbox: An automated and open-source ArcGIS tool to build and prioritize ecological corridors in urban landscapes. **Global Ecology and Conservation**, v. 22, p. e01012, jun. 2020.

WELLING, R. & DALTON J. DESAFIOS MUNDIAIS E AS RESPOSTAS QUE AS SBN ESTÃO DANDO ÀS QUESTÕES RELACIONADAS À ÁGUA. In: European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Herzog, C., Freitas, T., Wiedman, G. **Soluções baseadas na natureza e os desafios da água : acelerando a transição para cidades mais sustentáveis**. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/850594>. 38-45. 2022.

WORLD BANK. **A Catalogue of Nature-Based Solutions for Urban Resilience**. Washington, D.C., 2021.

WU, C.-L.; CHIANG, Y.-C. A geodesign framework procedure for developing flood resilient city. **Habitat International**, v. 75, p. 78–89, maio 2018.

YANG, B.; LI, S. J. Design with Nature: Ian McHarg's Ecological Wisdom as Actionable and Practical Knowledge. **Landscape and Urban Planning**, v. 155, 2016, p. 21-32. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.04.010>.

YAZICI, Sevil. A parametric landscape urbanism method: the search for an optimal solution. **A/Z: ITU Journal of Faculty of Architecture**, v. 13, p. 155-165, 2016. DOI: 10.5505/itujfa.2016.94546.

YIN, D. et al. Can flood resilience of green-grey-blue system cope with future uncertainty? **Water Research**, v. 242, p. 120315–120315, 1 ago. 2023.

YU, S. et al. A new approach of Robustness-Resistance-Recovery (3Rs) to assessing flood resilience: A case study in Dongting Lake Basin. **Landscape and Urban Planning**, v. 230, p. 104605, fev. 2023a.

YU, S. et al. Dealing with urban floods within a resilience framework regarding disaster stages. **Habitat International**. v. 136, p. 102783–102783, 1 jun. 2023b.