

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Arquitetura
Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável

Talita Silvia de Souza

**CIDADES ESPONJA: o uso do geoprocessamento aplicado ao planejamento de
gestão sustentável da água pluvial em Belo Horizonte-MG**

Belo Horizonte
2026

Talita Silvia de Souza

CIDADES ESPONJA: o uso do geoprocessamento aplicado ao planejamento de gestão sustentável da água pluvial em Belo Horizonte-MG

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável (PACPS) da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de mestre.

Área de concentração: Paisagem e Ambiente

Orientador: Profa. Dra. Staël de Alvarenga Pereira Costa

Belo Horizonte
2026

FICHA CATALOGRÁFICA

S729c

Souza, Talita Silvia de.

Cidades esponja [recurso eletrônico] : o uso do geoprocessamento aplicado ao planejamento de gestão sustentável da água pluvial em Belo Horizonte - MG / Talita Silvia de Souza. - 2026.

1 recurso eletrônico (205 f. : il.), pdf.

Orientadora: Stael de Alvarenga Pereira Costa.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura.

1. Planejamento urbano - Fatores climáticos - Teses. 2. Inundações - Teses. 3. Águas pluviais - Teses. 4. Mudanças climáticas - Teses. 5. Sustentabilidade e meio ambiente - Teses. I. Costa, Stael de Alvarenga Pereira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Arquitetura. III. Título.

CDD 333.7715981511



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AMBIENTE CONSTRUÍDO E PATRIMÔNIO SUSTENTÁVEL

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO da aluna **TALITA SILVIA DE SOUZA**, registro nº **2023703365**, DO CURSO DE MESTRADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO E PATRIMÔNIO SUSTENTÁVEL DA ESCOLA DE ARQUITETURA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Aos vinte e seis dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e seis, às nove horas, na sala 200, da Escola de Arquitetura da UFMG, situada à rua Paraíba, nº 697, Savassi, Belo Horizonte, reuniu-se a Comissão Examinadora da defesa de dissertação para julgar o trabalho "*CIDADES ESPONJAS: o uso do geoprocessamento aplicado ao planejamento de gestão sustentável da água pluvial em Belo Horizonte - MG*" requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre, na área de concentração "Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável". Abrindo a sessão, a orientadora, professora doutora Stael de Alvarenga Pereira Costa, após expor as Normas Regulamentares do Exame de defesa, pediu para a aluna iniciar a apresentação do seu trabalho. Seguiu-se arguição pelos examinadores com a respectiva defesa da candidata. Logo após a apresentação, a comissão reuniu-se, sem a presença da mestranda e do público, para julgamento e expedição do seguinte resultado:

- () Aprovação.
(x) Aprovação com solicitação das revisões constantes nesta ata.
() Reprovação.

A banca recomenda que as sugestões levantadas e as correções apontadas sejam devidamente incorporadas ao texto, bem como a inclusão de notas de rodapé sempre que houver termos técnicos específicos de outras áreas do conhecimento.

O resultado final foi comunicado publicamente à candidata pela Presidente da Comissão.

Nada mais havendo a tratar, a Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ata, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Prof^a. Dr^a. Stael de Alvarenga Pereira Costa
Escola de Arquitetura/UFMG - Orientadora

Prof^a. Dr^a. Luciana Souza Bragança
Escola de Arquitetura/UFMG

Prof. Dr. Marcelo Antônio Nero
Instituto de Geociências/UFMG

Prof^a. Dr^a. Karina Machado de Castro Simão

Arquitetura e Urbanismo/lbmec

Belo Horizonte, 26 de fevereiro de 2026.

Homologado pelo Colegiado do Programa dos cursos de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável:

Prof. Dr. Marco Antônio Penido de Rezende - "Ad Referendum"

Coordenador em exercício do PPG-ACPS

Assinatura dos membros da banca examinadora:



Documento assinado eletronicamente por **Marco Antonio Penido de Rezende, Chefe**, em 09/04/2026, às 16:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luciana Souza Bragança, Professora do Magistério Superior**, em 09/04/2026, às 17:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Stael de Alvarenga Pereira Costa, Professora do Magistério Superior**, em 09/04/2026, às 19:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Antonio Nero, Professor do Magistério Superior**, em 10/04/2026, às 08:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Karina Machado de Castro Simão, Usuário Externo**, em 10/04/2026, às 16:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5094541** e o código CRC **4C65AD45**.

CITAÇÃO DA CAPES

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001".

DEDICATÓRIA

A Deus,
para meus pais, Miria e Wilson; e minha avó Geralda,
pelo amor, apoio e afeto incondicionais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pelo dom da vida.

Aos meus pais, Miria e Wilson que sempre estão ao meu lado me apoiando, em especial a minha mãe que sou eternamente grata.

À minha avó Geralda pelo amor, apoio e carinho por mim, ao meu avó Saturnino Alexandre (*in memoriam*) pelo respeito as questões urbanas e sociais da cidade.

Ao meu estimado e amado Samuel Lourenço pelo apoio, admiração, carinho e pela parceria de vida que temos.

Aos meus afilhados Jenifer, Ana Carolina, Gabriel e Alessandro, pelos seus sorrisos, brincadeiras, admiração e carinho.

À minha orientadora, Prof. Dra. Staël de Alvarenga Pereira Costa, pela sua amizade, sabedoria, paciência, dedicação, compreensão e pelos conselhos.

Aos demais professores do programa de pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável (PACPS) da Escola de Arquitetura/UFMG, pelo conhecimento adquirido, em especial a Profa. Dra. Maria Manoela Gimmler. Netto por ter sido minha coorientadora por um certo período e ao Prof. Dr. Marcelo Nero pelo apoio e conhecimentos compartilhados.

Aos meus amigos da pós-graduação pela amizade, cumplicidade e torcida de sempre.

Aos colegas do grupo de estudos sobre *Hec Ras* pelo apoio e trocas de conhecimento.

Aos professores e amigos do Laboratório da Paisagem - LAP pelos conhecimentos compartilhados e pelo companheirismo.

Meu sincero agradecimento a todos os amigos e as pessoas que me apoiaram ao longo desta caminhada.

“A destruição do meu próprio paraíso é o que me faz pensar que precisamos de uma revolução; o cerne dessa revolução é o conceito de ‘cidades-esponja’.”

Kongjian Yu

RESUMO

Belo Horizonte, a capital de Minas Gerais, enfrenta inundações e alagamentos cada vez mais intensos e devastadores, fato que evidencia os problemas da relação entre os recursos hídricos e a cidade. O objetivo desta pesquisa de mestrado é compreender como a implementação do modelo de cidades esponja no planejamento urbano desta capital, com o uso do geoprocessamento, pode contribuir para a gestão sustentável da água pluvial e a mitigação dos impactos causados por inundações. A pesquisa adota uma abordagem interdisciplinar e inovadora, alinhada às diretrizes internacionais como o modelo de cidades esponja, oferecendo soluções sustentáveis e replicáveis para a drenagem urbana em contextos vulneráveis, com potencial de aplicação em políticas públicas no Brasil. O conceito de cidades esponja, propõe o uso de superfícies permeáveis para absorver e armazenar a água da chuva, além de contribuir para a mitigação de inundações em cenários de mudanças climáticas. O trabalho utiliza o método científico analítico com abordagem quali-quantitativa, integrando revisão bibliográfica, análise histórica e aplicação de geotecnologias. Serão empregadas técnicas como mapeamento temático, simulações hidrodinâmicas e análise espacial com uso de Sistema de Informação Geográfica (*SIG*) e dados georreferenciados, visando identificar áreas de inundações e avaliar a drenagem urbana para propor diretrizes com soluções baseadas na natureza. No entanto, constatou-se que a disponibilidade e a precisão dos dados hidrológicos e geográficos podem impactar, as vezes, a exatidão das simulações e a aplicabilidade imediata das propostas de intervenção urbana. Porém, o uso adequado de recursos hidrodinâmicos associados às geotecnologias, tais como o *Hec-Ras*, pode potencializar o planejamento urbano sustentável ao permitir a identificação de áreas vulneráveis às inundações, possibilitando intervenções mais eficazes. Com isso, espera-se descobrir que a aplicação do modelo de cidades esponja, aliado ao geoprocessamento, é viável em contextos urbanos como o de Belo Horizonte, contribuindo significativamente para a mitigação de enchentes e a melhoria da gestão das águas pluviais.

Palavras-chave: cidade esponja; geoprocessamento; paisagem urbana; drenagem urbana

ABSTRACT

The city of Belo Horizonte faces increasingly intense and devastating floods, a fact that highlights the problems in the relationship between water resources and the urban environment. The aim of this master's research is to understand how the implementation of the sponge city model in the urban planning of Belo Horizonte, supported by the use of geoprocessing, can contribute to sustainable stormwater management and to the mitigation of impacts caused by flooding. The research adopts an interdisciplinary and innovative approach, aligned with international guidelines such as the sponge city model, offering sustainable and replicable solutions for urban drainage in vulnerable contexts, with potential application in public policies in Brazil. The sponge city concept proposes the use of permeable surfaces to absorb and store rainwater, in addition to contributing to flood mitigation under climate change scenarios. The study employs an analytical scientific method with a qualitative–quantitative approach, integrating a literature review, historical analysis, and the application of geotechnologies. Techniques such as thematic mapping, hydrodynamic simulations, and spatial analysis using Geographic Information Systems (GIS) and georeferenced data will be applied, aiming to identify flood-prone areas and to assess urban drainage in order to propose guidelines with nature-based solutions. However, it is acknowledged that the availability and accuracy of hydrological and geographic data may, at times, affect the precision of simulations and the immediate applicability of proposed urban interventions. Nevertheless, the proper use of hydrodynamic modeling tools associated with geotechnologies, such as HEC-RAS, can enhance sustainable urban planning by enabling the identification of areas vulnerable to flooding, thereby allowing for more effective interventions. Thus, it is expected to demonstrate that the application of the sponge city model, combined with geoprocessing, is feasible in urban contexts such as Belo Horizonte, contributing significantly to flood mitigation and to improvements in stormwater management.

Keywords: sponge city; geoprocessing; urban landscape; urban drainage

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | Temática a ser desenvolvida no trabalho | 23 |
| Figura 2 | Esquema da modalidade da pesquisa | 26 |
| Figura 3 | Principais livros e artigos selecionados para a revisão bibliográfica | 29 |
| Figura 4 | Ciclo hidrológico da água | 32 |
| Figura 5 | Modelo convencional de urbanização e canalização dos rios | 33 |
| Figura 6 | Modelo urbano com infraestrutura verde e renaturalização dos rios | 34 |
| Figura 7 | Esquema do papel das árvores na absorção e retenção da água da chuva | 36 |
| Figura 8 | Diagrama comparativo entre as infraestruturas cinza e verdes | 38 |
| Figura 9 | Meios utilizados para implantação de uma cidade esponja | 39 |
| Figura 10 | Estrutura de um jardim de chuva | 41 |
| Figura 11 | Corte esquemático com as diferentes camadas dos jardins de chuva: em solo natural(a) e mais profundo com maior capacidade de retenção da água ligado ao sistema de drenagem (b) | 42 |
| Figura 12 | Jardins de chuva implantados na cidade de Belo Horizonte | 43 |
| Figura 13 | Camada de brita na entrada e saída do fluxo do volume de água no jardim | 44 |
| Figura 14 | Biovaleta do estacionamento do New Seasons Market em Portland, Oregon | 45 |
| Figura 15 | Estrutura de uma Biovaleta | 46 |
| Figura 16 | Telhado verde com vegetação forrageira na cidade de Belo Horizonte | 48 |
| Figura 17 | Camadas de um telhado verde | 49 |
| Figura 18 | Telhados verdes com agricultura urbana Carrot City | 50 |
| Figura 19 | Praça-Piscina com água acumulada na parte com cota inferior as demais | 51 |
| Figura 20 | Comparação da porosidade do calçamento permeável com o calçamento de concreto | 53 |
| Figura 21 | Piso permeável na entrada de um prédio em Belo Horizonte | 53 |
| Figura 22 | Parque alagável de Haikou Fengxiang | 54 |
| Figura 23 | Relação conceitos com a gestão das águas pluviais urbanas | 58 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Figura 24 | Modelo conceitual de uma cidade esponja com os mecanismos para a absorção da água da chuva | 60 |
| Figura 25 | Esquema do Geoprocessamento | 61 |
| Figura 26 | Os quatro universos | 64 |
| Figura 27 | Combinação de dados espaciais com modelo matricial (<i>raster</i>) e vetorial | 65 |
| Figura 28 | Captura de imagens por sensoriamento remoto | 68 |
| Figura 29 | Modelo digital de elevação: a) Alos Palsar; b) Sentinel-2; c) Zoom de uma área utilizando o Alos Palsar; d) Zoom de uma área utilizando o Sentinel-2; e) Zoom de uma área utilizando as curvas de nível de 5m BHmaps | 71 |
| Figura 30 | MDS (A) e MDT (B) da bacia experimental do rio Saci | 74 |
| Figura 31 | Resultado de simulação hidrodinâmica no HEC-RAS | 77 |
| Figura 32 | Esquema para o desenvolvimento da pesquisa | 80 |
| Figura 33 | Planta topográfica da Cidade de Minas Belo Horizonte (1895) com a retificação dos cursos d'água para o traçado ortogonal | 83 |
| Figura 34 | Mapa do Arraial de Belo Horizonte em 1894 | 84 |
| Figura 35 | Planta Cadastral da cidade de Belo Horizonte projetada pela CCNC com a retificação do curso natural do Ribeirão Arrudas | 84 |
| Figura 36 | Linha do tempo da história hídrica de Belo Horizonte de 1897 a 1980 | 86 |
| Figura 37 | Linha do tempo da história hídrica de Belo Horizonte de 1980 a 2020 | 88 |
| Figura 38 | Linha do tempo da história e da paisagem urbana de Belo Horizonte de 1897 a 1930 | 90 |
| Figura 39 | Linha do tempo da história e da paisagem urbana de Belo Horizonte de 1930 a 1970 | 91 |
| Figura 40 | Linha do tempo da história e da paisagem urbana de Belo Horizonte de 1970 a 2024 | 92 |
| Figura 41 | Possíveis fringe belts e Espaços livres do município de Belo Horizonte | 98 |
| Figura 42 | Espaços Livres intraquadra no município de Belo Horizonte | 100 |
| Figura 43 | Relevo e principais curso d'água no município de Belo Horizonte | 102 |
| Figura 44 | Belo Horizonte-Recursos Hídricos e Geomorfologia | 105 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Figura 45 | Bacia do Ribeirão Arrudas e as bacias adjacentes | 109 |
| Figura 46 | Bacia hidrográfica do Ribeirão Arrudas | 110 |
| Figura 47 | Vista aérea do Ribeirão Arrudas | 112 |
| Figura 48 | Localização da área de estudo na bacia hidrográfica do Ribeirão Arrudas em Belo Horizonte – Minas Gerais | 115 |
| Figura 49 | Localização da área de estudo Ribeirão Arrudas – Avenida Teresa Cristina | 117 |
| Figura 50 | Análise do canal do Ribeirão Arrudas – Avenida Teresa Cristina | 119 |
| Figura 51 | Canal aberto e canalizado no ribeirão | 120 |
| Figura 52 | Canal fechado e canalizado no ribeirão | 121 |
| Figura 53 | Recorte das Microbacias na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Arrudas | 123 |
| Figura 54 | Modelo digital de elevação (MDE) com área do Merge inserida nas Bacias do Ribeirão Arrudas e Ribeirão do Onça | 124 |
| Figura 55 | Uso e cobertura da terra no trecho do Ribeirão Arrudas – Área de estudo da Avenida Teresa Cristina, com base na Coleção 9 do MapBiomas Brasil | 127 |
| Figura 56 | Mapa da mancha de inundação realizada com o MDE Sentinel-2 | 129 |
| Figura 57 | Modelo digital do Terreno (MDT) com área do Merge inserida nas Bacias do Ribeirão Arrudas | 131 |
| Figura 58 | Mapa de uso e ocupação do solo | 133 |
| Figura 59 | Interseção do raster do MapBiomas com o mapa de uso e ocupação do solo | 134 |
| Figura 60 | Esquema de sobreposição de camadas para o desenvolvimento da simulação | 135 |
| Figura 61 | Uso e cobertura da terra com base na Coleção 9 do MapBiomas Brasil e o uso e ocupação do solo BHMaps relacionados as classes da tabela 1 | 137 |
| Figura 62 | Mapa da mancha de inundação realizada com o MDT Prodabel | 141 |
| Figura 63 | Mapa de comparação entre as manchas de inundação realizada com o MDT Prodabel e pela Carta de inundações da PBH | 142 |
| Figura 64 | Possíveis Fringe Belts ampliado na área do projeto de parque alagável | 147 |
| Figura 65 | Espaços Livres intraquadra ampliado na área do projeto de parque alagável | 149 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Figura 66 | Mapa da mancha de inundação com área alagável as margens do ribeirão com a segmentação dos trechos | 151 |
| Figura 67 | Mapeamento da proposta de áreas para a implantação das soluções de infraestrutura verde | 154 |
| Figura 68 | Ampliação da proposta de parque alagável e infraestrutura verde trecho 1 | 156 |
| Figura 69 | Ampliação da proposta de parque alagável e infraestrutura verde no Ribeirão Arrudas: integração com os córregos Cercadinho e Bonsucesso | 157 |
| Figura 70 | Mapa de manchas de inundação com simulação do cenário com infraestruturas nos trechos 1 | 158 |
| Figura 71 | Mapa de manchas de inundação com simulação do cenário com infraestruturas nos trechos 2 | 159 |
| Figura 72 | Proposta de implantação de um Parque Esponja Alagável | 166 |
| Figura 73 | Estudo de ampliação da proposta de implantação do parque alagável e da infraestrutura verde – Trecho 1 | 168 |
| Figura 74 | Estudo de ampliação da proposta de implantação do parque alagável e da infraestrutura verde – Trecho 1 | 169 |
| Figura 75 | Estudo de ampliação da proposta de implantação do parque alagável e da infraestrutura verde – Trecho 2 | 170 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|--|-----|
| Tabela 1 | Coeficientes de manning correlacionados as classes de cobertura do Mapbiomas e as tipologias de uso e ocupação do solo | 138 |
| Tabela 2 | Valores sugeridos de coeficiente de Manning (n) com base na Literatura | 146 |
| Tabela 3 | Comparação dos cenários hidrológicos e espaciais (valores estimados) | 171 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------|---|
| ASTER | <i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i> |
| AW3D30 | <i>Alos World 3D30</i> |
| BH | Belo Horizonte |
| BMPs | Melhores Práticas de Gestão |
| CBERS | <i>China-Brazil Earth Resources Satellite</i> |
| CCNC | Comissão Construtora da Nova Capital |
| CGIS | <i>Canadian Geographic Information System</i> |
| CE | Comissão Europeia |
| DRENURBS | Programa de Recuperação Ambiental e Saneamento de Fundos de Vale de Córregos em Leito Natural |
| ESA | <i>European Space Agency</i> |
| GDEM | <i>Global Digital Elevation Model</i> |
| GMES | <i>Global Monitoring for Environment and Security</i> |
| HEC-RAS | <i>Hydrologic Engineering Center - River Analysis System</i> |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| IPTU | Imposto Predial e Territorial Urbano |
| LID | <i>Low Impact Development</i> |
| LIUDD | <i>Low Impact Urban Design and Development</i> |
| MCTI | Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação |
| MDE | Modelo Digital de Elevação |
| MDS | Modelo Digital de Superfície |
| MDT | Modelo Digital do Terreno |
| NASADEM | <i>NASA Digital Elevation Model</i> |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| PBH | Prefeitura de Belo Horizonte |
| PRODABEL | Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte |
| QGIS | <i>Quantum GIS</i> |
| SAR | Radar de Abertura Sintética |
| SbN | Soluções Baseadas na Natureza |
| SCBH | Sub-Comitê da Bacia Hidrográfica |
| SCP | <i>Sponge City Program</i> |

| | |
|--------|---|
| SIG | Sistemas de Informações Geográficas |
| SIRGAS | Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas |
| SRTM | <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> |
| SUDs | Sistemas de Drenagem Sustentável |
| UTM | <i>Universal Transverse Mercator</i> |
| WGS | <i>World Geodetic System</i> |
| WSUD | <i>Water Sensitive Urban Design</i> |
| DER-MG | Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 20 |
| 1.1 | Justificativa..... | 21 |
| 1.2 | Objetivo | 23 |
| 1.3 | Organização do Trabalho | 24 |
| 1.4 | Metodologia | 25 |
| 1.5 | Importância da interdisciplinaridade..... | 30 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO-CONCEITUAL | 31 |
| 2.1 | CIDADES ESPONJA..... | 31 |
| 2.1.1 | O Rio e a Cidade | 31 |
| 2.2 | <i>SPONGE CITY PROGRAM</i> (PROGRAMA CIDADES ESPONJA)..... | 38 |
| 2.2.1 | Jardins de Chuva | 39 |
| 2.2.2 | Biovaletas | 44 |
| 2.2.3 | Telhados Verdes..... | 46 |
| 2.2.4 | Praças-Piscinas..... | 50 |
| 2.2.5 | Pavimentos Permeáveis | 52 |
| 2.2.6 | Parques Alagáveis | 53 |
| 2.3 | Gestão Sustentável da água | 56 |
| 2.3.1 | Gestão Sustentável da água nas Cidades Esponjas..... | 58 |
| 2.4 | GEOPROCESSAMENTO (GEOTECNOLOGIA)..... | 60 |
| 2.4.1 | Sistema de Informações Geográfica (SIG)..... | 62 |
| 2.4.2 | Sensoriamento Remoto | 67 |
| 2.4.3 | Modelo Digital de Elevação – MDE | 69 |
| 2.4.4 | Modelo Digital de Terreno – MDT..... | 72 |
| 2.4.5 | Modelagens Espaciais – <i>HEC-RAS</i> | 75 |
| 3 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | 78 |
| 4 | ESTUDO DE CASO | 82 |
| 4.1 | Ribeirão Arrudas e Belo Horizonte - Contexto Histórico e Urbano | 82 |
| 4.2 | A Paisagem de Belo Horizonte | 94 |
| 4.3 | Contexto Geohidrológico..... | 103 |
| 4.4 | O Ribeirão Arrudas..... | 108 |
| 5 | MATERIAIS E MÉTODOS PARA A ANÁLISE INTEGRADA DAS | |

| | |
|---|------------|
| ENCHENTES URBANAS NO RIBEIRÃO ARRUDAS, BELO HORIZONTE..... | 114 |
| 5.1 Área de Estudo de Caso..... | 114 |
| 5.2 Delineamento Experimental do Ribeirão Arrudas | 118 |
| 5.3 Simulações Hidrodinâmicas no <i>HEC-RAS</i> com uso de MDE Sentinel-2. | 121 |
| 5.4 Simulações Hidrodinâmicas no <i>HEC-RAS</i> com uso de MDT Prodabel... | 130 |
| 6 PROPOSTAS E DISCUSSÕES | 145 |
| 6.1 Mapeamento para Implementação de medidas de Infraestrutura Verde | 145 |
| 6.2 Propostas de Diretrizes para o Planejamento Urbano | 160 |
| 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 172 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 175 |
| APÊNDICES | 198 |
| ANEXOS | 204 |

1 INTRODUÇÃO

As cidades, de uma maneira geral, foram construídas às margens dos rios (Azevedo et al., 2025, Gonçalves et. al, 2025, Santos et al., 2025, Carneiro et al., 2026). O mesmo aconteceu em Belo Horizonte, no decorrer da história, cuja relação com o corpo d'água urbano nem sempre foi harmoniosa. De fato, a canalização resultou em uma série de problemas que impactam a cidade na contemporaneidade, especialmente durante chuvas intensas, que frequentemente provocam alagamentos e inundações, conforme comentado por Costa e Rodrigues (2025) e Sales et al. (2025).

A busca por soluções para os problemas urbanos ocasionados pelas fortes chuvas e pelo planejamento urbano que desconsiderou os cursos d'água é o foco central deste trabalho. A proposta é investigar de que forma soluções alternativas de drenagem baseadas na natureza com o auxílio do georreferenciamento, por meio do uso de dados georreferenciados e outras tecnologias, pode colaborar para a mitigação desses impactos nas cidades.

A adoção de soluções alternativas de drenagem para reduzir as inundações na cidade deve ser tratada como um tema relevante para investigação acadêmica, além de subsidiar decisões políticas e promover benefícios socioambientais (Morais, 2022). As soluções baseadas na natureza (SbN) já demonstraram que as inovações tecnológicas podem integrar a infraestrutura urbana ao meio ambiente pela arquitetura da paisagem. Neste trabalho, o mapeamento dessas tecnologias busca compreender as soluções já implementadas e passíveis de aplicação, para mitigar os impactos das chuvas em Belo Horizonte e reduzir os prejuízos associados.

Em centros urbanos como Belo Horizonte, episódios recorrentes de inundações evidenciam a vulnerabilidade dos sistemas de drenagem tradicionais e a necessidade de soluções integradas ao ambiente construído. Nesse contexto, novas abordagens, como o conceito de cidades esponja, têm alcançado destaque por proporem estratégias sustentáveis e adaptativas de manejo da água, combinando infraestrutura verde e planejamento urbano resiliente.

Para enfrentar os desafios impostos pelas enchentes urbanas, o conceito de cidades esponja torna-se referência central neste trabalho. Trata-se de uma abordagem de

gestão sustentável da água pluvial que visa reestabelecer a capacidade de infiltração e retenção das superfícies urbanas por meio do uso de soluções baseadas na natureza. Desenvolvida na China como resposta às perdas recorrentes causadas por eventos extremos de precipitação, essa estratégia propõe a integração de infraestrutura verde e azul na zona urbana (Zeng et al., 2023; He et al., 2019; Chan et al., 2018).

1.1 Justificativa

Belo Horizonte, assim como muitas outras cidades brasileiras, enfrenta diversos problemas decorrentes de um planejamento urbano ineficiente (Souza, 2020; Morais, 2022). Nos últimos anos, especialmente durante o verão, eventos de alagamentos e inundações tornaram-se mais recorrentes, intensificados por um cenário de rápidas mudanças climáticas, que resultam em prejuízos sociais, econômicos e ambientais significativos.

Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais, configura-se como um importante centro urbano brasileiro, com população estimada em 2.315.560 habitantes, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022). Inserida na Região Metropolitana de Belo Horizonte, a cidade apresenta elevada densidade populacional e intensa dinâmica de expansão urbana, fatores que ampliam a pressão sobre a infraestrutura urbana e os sistemas de drenagem. Esse contexto, associado à ocupação progressiva de áreas ambientalmente sensíveis, como fundos de vale e margens de cursos d'água, contribui para o agravamento dos problemas relacionados às inundações e alagamentos, especialmente em períodos de precipitação intensa (IBGE, 2022; Tucci, 2008; Baptista; Nascimento; Barraud, 2005; Canholi, 2005).

A capital mineira também carrega um histórico marcado pela canalização de seus cursos d'água (Borsagli, 2019), o que contribui para o aumento da velocidade de escoamento da água e, conseqüentemente, para a ocorrência de inundações. Como destaca Souza (2020, p. 15), “as mudanças climáticas provocam intensas e devastadoras tempestades, caracterizando uma nova realidade do clima”. A cidade possui fatores naturais e urbanos que contribuem para a ocorrência frequente de enchentes e alagamentos, como a presença de diversos cursos d'água vedados e canalizados, cujo relevo acidentado contribui para a velocidade de escoamento e as

deficiências no sistema de drenagem pluvial (Morais, 2022).

Além desses fatores, é importante destacar que Belo Horizonte foi originalmente implantada em uma região de vale, atravessada por inúmeros cursos d'água. A escolha desse sítio urbano, combinada ao acelerado processo de urbanização ao longo do século XX, resultou na ocupação intensa de áreas de várzea e na canalização de córregos, muitas vezes de forma subterrânea (Carvalho e Lima, 2009; Macedo, 2004).

Segundo Amaral, Costa e Muzzi (2017) a dinâmica geomorfológica do Quadrilátero Ferrífero, marcada por vales encaixados e calhas naturalmente rasas, faz com que cursos d'água como o Ribeirão Arrudas percam rapidamente sua capacidade de contenção durante eventos de chuva intensa, transbordando para as áreas marginais. Diante desse padrão físico aliado ao intenso processo de urbanização, a impermeabilização das superfícies agrava o comportamento hidrológico, de modo que, como as margens estão impermeabilizadas. As inundações são a consequência previsível, no qual a água tende a ocupar espaços que não são adequados à sua fluidez.

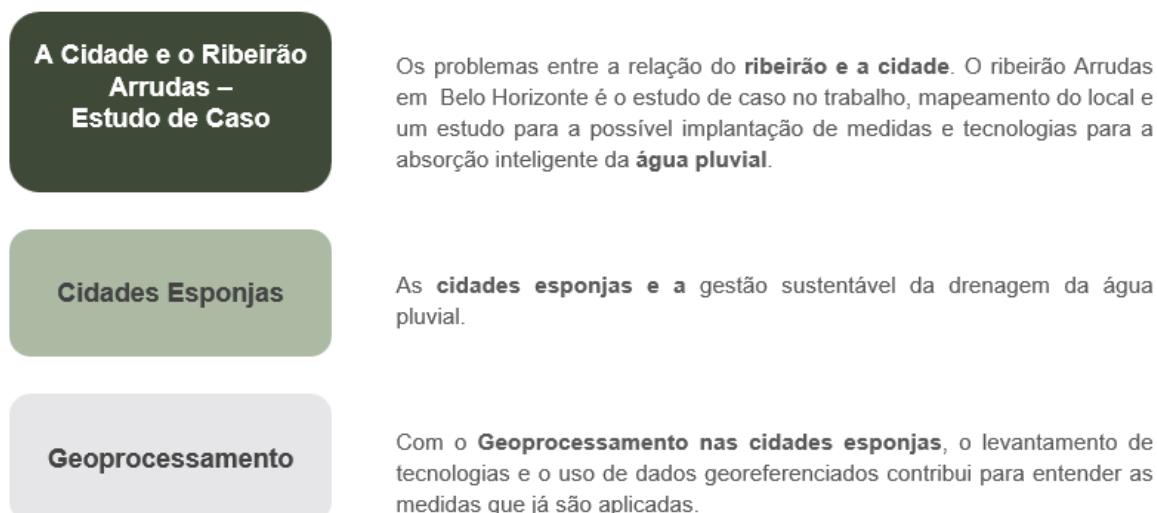
Esse modelo de crescimento urbano priorizou a expansão da malha viária e a construção civil em detrimento da permeabilidade do solo, favorecendo o aumento do escoamento superficial e a redução da infiltração. A impermeabilização progressiva do território, somada à insuficiência da infraestrutura de drenagem, agravou a recorrência de inundações, alagamentos e outros impactos socioambientais ao longo do tempo.

Uma das premissas centrais deste trabalho é a análise das chuvas urbanas e das tecnologias aplicadas na mitigação de seus impactos, com destaque para experiências internacionais, como as cidades esponja, referência global na adoção de estratégias sustentáveis de drenagem urbana. A proposta busca compreender como essas soluções podem ser adaptadas e aplicadas à realidade de Belo Horizonte, visando promover uma convivência mais harmônica entre a cidade e água.

A pesquisa levanta a seguinte questão – Como o conceito de cidades esponja, apoiado por tecnologias como o geoprocessamento, pode auxiliar no planejamento urbano e combater as inundações na capital mineira? As medidas e as ferramentas de

tecnologia inseridas para a gestão da drenagem urbana na cidade deverão ser analisadas e referenciadas ao longo do desenvolvimento do trabalho. Na figura 1 temos os principais temas e eixos da pesquisa que serão abordados durante o processo de elaboração do trabalho.

Figura 1 – Temática a ser apresentada no trabalho



Fonte: Autora, 2026.

1.2 Objetivo

O objetivo geral do trabalho é compreender como os sistemas de drenagens urbanas empregados nas cidades esponja podem melhorar a drenagem e gestão da água da chuva em Belo Horizonte, evitando as enchentes. Dentre os objetivos específicos têm-se:

- Investigar como as tecnologias e os sistemas de drenagens urbanas utilizadas nas cidades esponja podem ser avaliados e empregados em cidades como Belo Horizonte.
- Avaliar o emprego de geotecnologias como ferramenta de apoio para a melhoria da drenagem urbana e à gestão das águas pluviais em Belo Horizonte.
- Sugerir soluções tecnológicas e diretrizes que podem mitigar os problemas recorrentes de inundações na cidade de Belo Horizonte.

1.3 Organização do Trabalho

O desenvolvimento do trabalho se organiza em capítulos que abordam de forma progressiva os fundamentos teóricos, a contextualização prática e a aplicação de ferramentas técnicas voltadas à gestão sustentável da água em ambientes urbanos, com foco na cidade de Belo Horizonte.

No Capítulo 2 são apresentados os referenciais teórico-conceituais que fundamentam a pesquisa, integrando os conceitos de Cidades Esponja e as ferramentas do Geoprocessamento. A abordagem teórica do modelo de Cidades Esponja é explorada como estratégia de adaptação urbana às mudanças climáticas, com foco na gestão sustentável da água por meio de soluções baseadas na natureza (SbN). Em paralelo, este mesmo capítulo apresenta os métodos do Geoprocessamento aplicados à análise espacial do ambiente urbano, utilizando dados georreferenciados, Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e modelagens hidrológicas para identificar áreas de risco e orientar intervenções. O geoprocessamento fundamenta-se em referenciais teóricos que envolvem a análise espacial, os sistemas de informação geográfica (SIG), o sensoriamento remoto, o modelo digital de elevação (MDE) e modelo digital do terreno (MDT), permitindo compreender, modelar e representar fenômenos geoespaciais de forma integrada.

O Capítulo 3 – Procedimentos Metodológicos apresenta a estrutura metodológica da pesquisa, que adota uma abordagem quali-quantitativa, exploratória e aplicada, com base em revisão bibliográfica e estudo de caso. O trabalho envolve o levantamento teórico sobre soluções sustentáveis de drenagem urbana inspiradas no modelo de cidades esponja, aliado ao uso de geotecnologias, a análise hidrodinâmica e mapeamento de áreas de inundação. Foram utilizados dados hidrológicos, históricos e espaciais, analisados por meio de SIG e simulações hidrodinâmicas. A união desses dois eixos permite estruturar uma metodologia científica que associa conceitos urbanísticos e ambientais ao uso de tecnologias digitais, aplicadas ao contexto de Belo Horizonte.

O Capítulo 4 – Estudo de Caso: Ribeirão Arrudas e Belo Horizonte (Contexto Histórico e Urbano) configura historicamente uma análise do Ribeirão Arrudas, permitindo relacionar as práticas de planejamento urbano e gestão da água adotadas historicamente com os impactos socioambientais observados nas últimas

décadas do século XX e XXI.

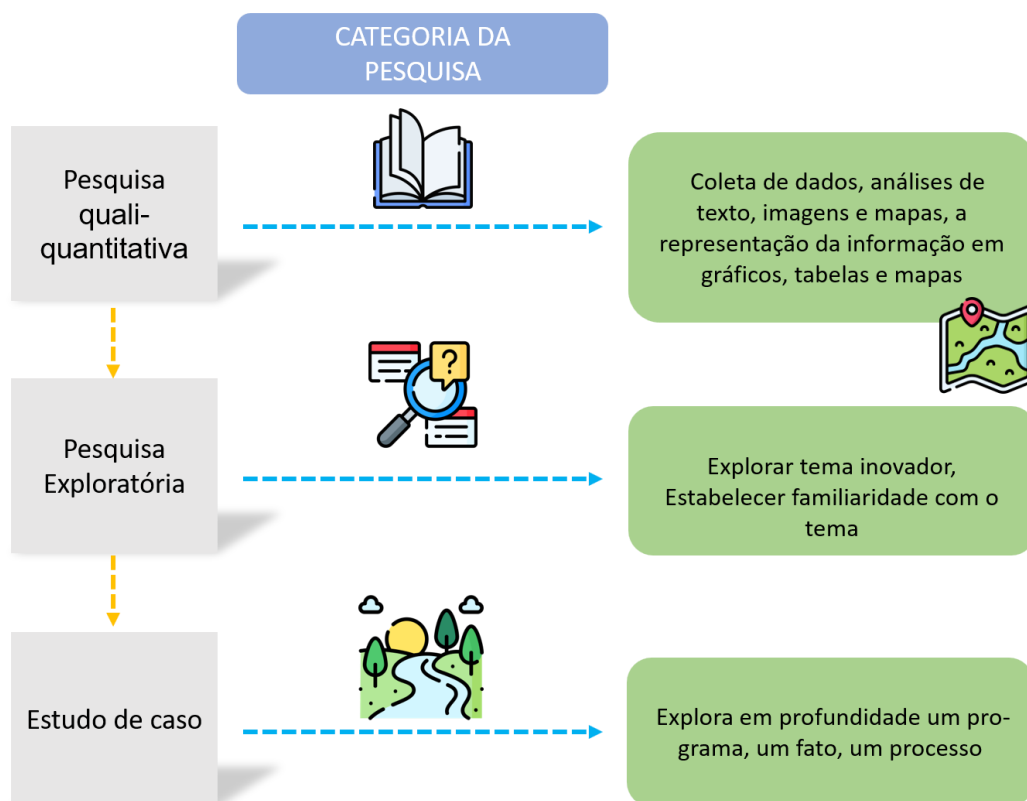
O Capítulo 5 – Materiais e Métodos apresentou os procedimentos técnicos da pesquisa, com ênfase nas simulações hidrodinâmicas realizadas no *software HEC-RAS*. Este capítulo integra dados geográficos e hidrológicos para analisar os alagamentos na área de estudo localizada na Avenida Teresa Cristina e embasar propostas de intervenção inspiradas no conceito de cidades esponja.

Por fim, o Capítulo 6 - Propostas e Discussões apresenta os produtos cartográficos gerados ao longo da pesquisa, com destaque para os mapas que delimitam áreas críticas de alagamento e identificam regiões mais propícias à adoção de infraestrutura verde. Os resultados são confrontados com os princípios teóricos abordados, a fim de refletir criticamente sobre a viabilidade e relevância da integração das SbN ao planejamento urbano de Belo Horizonte. Para tanto, na área específica de estudo são realizados recortes territoriais e simulações hidrológicas que representam os cenários atual e futuro.

1.4 Metodologia

A metodologia deste trabalho foi estruturada a partir de um método científico analítico, com abordagem quali-quantitativa e aplicação de geotecnologias para a identificação de áreas suscetíveis às inundações. Foram utilizados dados hidrológicos, históricos e espaciais, analisados por meio de sistemas de informações geográficas (SIG) e simulações hidrodinâmicas. O objetivo compreendeu o comportamento da água em áreas urbanas e a proposta de intervenções sustentáveis, as quais são baseadas no conceito de cidades esponja. Na figura 2 é apresentado um esquema sobre a modalidade e caracterização da pesquisa.

Figura 2 – Esquema da modalidade da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Para investigar como as tecnologias e os sistemas de drenagem urbana empregados nas cidades esponja podem ser avaliados e aplicados em outras realidades urbanas, foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática sobre o mesmo conceito. Esse levantamento contemplou as referências nacionais e internacionais que tratam de SbN, infraestrutura verde e drenagem urbana sustentável, com o objetivo de consolidar o estado da arte. A análise permitiu identificar os princípios norteadores do modelo, bem como suas potencialidades e limitações, oferecendo a base teórica necessária para orientar as etapas posteriores do estudo.

Na busca de referenciais teóricos nacionais e internacionais a pesquisa se caracterizou por possuir caráter qualitativo e exploratório. Segundo Creswell (2010), ao conduzir um estudo qualitativo, uma de suas principais características é o caráter investigativo, voltado à compreensão aprofundada dos fenômenos analisados. Esse tipo de abordagem é especialmente adequado quando se busca examinar percepções, valores e práticas locais relacionadas à ocupação do território, à gestão dos recursos naturais ou à ocorrência de eventos extremos, como enchentes e

deslizamentos.

A seguir, será apresentada a base teórica referenciando autores que fundamentam as escolhas metodológicas e os conceitos-chave da investigação. Este trabalho se apoiou em uma base teórica construída a partir de autores que abordam, sob diferentes perspectivas, a relação entre natureza, cidade e tecnologia. Com isso, o embasamento teórico desta pesquisa está consolidado em uma ampla gama de autores que abordam desde fundamentos da paisagem urbana até inovações no campo das cidades esponja.

Um dos pilares conceituais é elaborado por McHarg (1992), cujo livro, denominado em inglês *Design with Nature* (Projete com a Natureza) estabelece fundamentos para o planejamento ambiental integrado. O autor defende a leitura do território como instrumento essencial para intervenções urbanas sustentáveis.

No campo aplicado ao espaço urbano, destaca-se a contribuição de Spink (2006), especialmente com a obra *O Jardim de Concreto*, que propõe uma leitura crítica e sensível da paisagem urbana e da apropriação dos espaços públicos em contextos densamente impermeabilizados. Ao mesmo tempo, a autora aponta para a importância da gestão e recuperação da água nas cidades como elemento estruturador de uma urbanização mais resiliente e integrada à natureza.

Esses referenciais dialogam com experiências práticas, como o projeto "Colar de Esmeraldas" em Boston concebido por Frederick Law Olmsted desenvolvido entre 1878 e 1896, que exemplifica como soluções baseadas na natureza podem resgatar o valor ecológico e social dos rios urbanos. Forman (2019) com suas contribuições à ecologia da paisagem, tais como em *Landscape Ecology e Towns, Ecology, and the Land* (Ecologia da Paisagem e Cidades, Ecologia e o Território, traduzido ao português), oferece base essencial para compreender as dinâmicas ambientais no meio urbano. Cormier e Pellegrino (2008) complementam esse debate ao tratarem da infraestrutura verde como estratégia paisagística para o manejo da água.

No campo das cidades esponja, diversos autores internacionais como Chan et al. (2018), Yin et al. (2021), Zhou et al. (2018), Zhu et al. (2025), Wan e Zhang (2026), entre outros, apresentam estudos de caso, métodos analíticos e sistemas aplicáveis à drenagem sustentável, como o uso de LID (*Low Impact Development* – Desenvolvimento de Baixo Impacto) e tecnologias baseadas na natureza. No

contexto nacional, pesquisadores como Reis et al. (2012), Santana (2014), Morais (2022), Fontoura (2025), contribuem com análises locais sobre inundações, modelagem territorial e geoprocessamento. Os três primeiros autores oferecem subsídios teóricos e metodológicos fundamentais para embasar a análise do caso de estudo e a construção de diretrizes projetuais voltadas à resiliência urbana em Belo Horizonte e o último em Porto Alegre-RS.

O levantamento teórico e bibliográfico sobre as principais soluções de drenagem urbana sustentáveis adotadas em cidades esponja foi realizado para compreender o panorama atual de iniciativas que valorizam a arquitetura paisagística e sua contribuição para a mitigação dos problemas de drenagem urbana. A revisão bibliográfica foi desenvolvida a partir da leitura de artigos publicados, acessados por meio de pesquisas no Google Acadêmico, Science Direct, Scielo e na base de dados da Universidade Federal de Minas Gerais; a Figura 3 apresenta alguns dos artigos e livros utilizados nesse processo.

Figura 3 - Principais livros e artigos selecionados para a revisão bibliográfica

| Título do livro ou artigo | Autor (es) | Ano da publicação | Tema relacionado |
|--|---|-------------------|---|
| Design with Nature | Ian McHarg | 1992 | Paisagem Urbana Geoprocessamento |
| Landscape Ecology | Richard T. T. Forman Micgel Godron | - | Paisagem Urbana |
| Towns, Ecology, and the Land | Richard T. T. Forman | 2019 | Paisagem Urbana |
| O Jardim de Concreto | Ana Clara Spink | 2006 | Paisagem Urbana, Geoprocessamento Drenagem Urbana |
| Infra-estrutura verde: uma estratégia paisagística para a água urbana. | Nathaniel S. Cormier e Paulo Renato Mesquita Pellegrino | 2008 | Paisagem e Drenagem Urbana |
| Effective Evaluation of Infiltration and Storage Measures in Sponge City Construction: A Case Study of Fenghuang City | Jinjun Zhou , Jiahong Liu, Weiwei Shao, Yingdong Yu, Kun Zhang, Ying Wang e Chao Mei | 2018 | Cidade Esponja |
| O escoamento superficial como condicionante de inundações em Belo Horizonte, MG: Estudo de caso da sub-bacia córrego do leitão, Bacia do ribeirão Arrudas. | Patricia Elizamma Reis, Maria Giovana Parizzi, Danilo Marques de Magalhães e Ana Clara Mourão Moura. | 2012 | Drenagem Urbana |
| Proposta da rede de monitoramento das águas Subterrâneas na sub- bacia do ribeirão Arrudas, região Central de Belo Horizonte - MG. | Patrícia Pascoal Goulart e Raphael Elias Pereira da Cruz | 2012 | Drenagem Urbana |
| Governance of the Sponge City Programme in China with Wuhan as a case study | Liping Dai, Helena F. M. W. van Rijswijk, Peter P. J. Driessen e Andrea M. Keessen | 2017 | Cidade Esponja |
| Storm Water Management and Flood Control in Sponge City Construction of Beijing | Shuhan Zhang , Yongkun Li, Meihong Ma, Ting Song e Ruining Song | 2018 | Cidade Esponja |
| Sistemas sustentáveis de drenagem urbana: dispositivos | Mariele de Souza Parra Agostinho e Cristiano Poletto | 2012 | Drenagem |
| Optimization of China Sponge City Design: The Case of Lincang Technology Innovation Park | Nan Li e Chengxin Qin and Pengfei Du | 2018 | Cidade Esponja |
| Geoprocessamento na modelagem parametrizada da paisagem territorial: Aplicações da geovisualização na simulação da paisagem urbana | Sheyla Aguilar de Santana | 2014 | Geoprocessamento |
| O escoamento superficial como condicionante de inundações em Belo Horizonte | Patricia Elizamma Reis, Maria Giovana Parizzi, Danilo Marques de Magalhães, Ana Clara Mourão Moura | 2012 | Drenagem Urbana |
| Sponge City Practices in China: From Pilot Exploration to Systemic Demonstration | Dingkun Yin, Changqing Xu, Haifeng Jia, Ye Yang, Chen Sun, Qi Wang, Sitong Liu | 2022 | Cidade Esponja |
| Sponge City Construction in China: A Survey of the Challenges and Opportunities | Hui Li, Liuqian Ding, Minglei Ren, Changzhi Li, Hong Wang | 2017 | Cidade Esponja |
| Sponge city practice in China: A review of construction, assessment, operational and maintenance | Dingkun Yin, Ye Chen, Haifeng Jia, Qi Wang, Zhengxia Chen, Changqing Xu, Qian Li, Wenliang Wang, Ye Yang, Guangtao Fu e Albert S. Chen | 2020 | Cidade Esponja |
| Governance of the Sponge City Programme in China with Wuhan as a case study | Liping Dai, Helena F.M.W. van Rijswijk, Peter P.J. Driessen, Andrea M. Keessen | 2019 | Cidade Esponja |
| Sponge City Program (SCP) and urban flood management (UFM)—the case of Guiyang, SW China | Yunfei Qi, Faith Ka Shun Chan, James Griffiths, Meili Feng, Yanfang Sang, Emily O'Donnell, Michael Hutchins, Dimple R. Thadani, Gang Li, Mengqi Shao, Linjun Xie, Sitong Liu, Chunguang Zhang, Xinan Li, Lingyun Liu e Ming Zhong | 2021 | Cidade Esponja |
| A holistic analysis of Chinese sponge city cases by region: Using PLS-SEM models to understand key factors impacting LID performance | Zhou Guo, Xiang Zhang, Ryan Winston, Joseph Smith, Yifan Yang, Shiyong Tao, Haoyuan Liu | 2024 | Cidade Esponja |
| ESSCC: A new multi-scale and extensively applicable evaluation system for the construction of sponge cities | Meng-Qi Ding, Mei-Yun Lu, Chen-Hao Cui, Jie Ding, Ji-Wei Pang, Nan-Qi Ren, Shan-Shan Yang | 2023 | Cidade Esponja |
| Sustainable Urban Drainage System (SUDS) modeling supporting decision-making: A systematic quantitative review | Pascual Ferrans , María N. Torres, Javier Temprano e Juan Pablo Rodríguez Sánchez | 2022 | Sistema de Drenagem Urbana Sustentável |
| Utilization of constructed wetland technology in China's sponge city scheme under carbon neutral vision | Yamei Cai, Yaqian Zhao, Ting Wei, Wei Fu, Cheng Tang, Yujie Yuan, Qi Yin, Cong Wang | 2023 | Cidade Esponja |
| Sponge City in China—A breakthrough of planning and flood risk management in the urban context | Faith Ka Shun Chan, James A. Griffiths, David Higgitt, Shuyang Xu, Fangfang Zhu, Yu-Ting Tang, Yuyao Xu, Colin R. Thorne | 2018 | Cidade Esponja |
| Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada de bacias e sistemas lagunares com influência do vento | Vitória Ache Rocha Lopes | 2017 | Geoprocessamento – <i>Hec-Ras</i> |
| Simulação no software HEC-RAS da mancha de inundação do rio Itabirito na cidade de Itabirito – MG para diferentes períodos de retorno. | Ana Flávia Silva Campos | 2023 | Geoprocessamento – <i>Hec-Ras</i> |

| | | | |
|---|--|------|--|
| Discussão sobre “Mitigação da poluição em águas pluviais urbanas por meio de concreto permeável totalmente reciclado com agregados, incorporando resíduos de bauxita e biochar de casca de arroz” | Mrunal S. Bokade, Devendra Narain Singh | 2025 | Sistema de Drenagem Urbana Sustentável |
| Desbloqueando o potencial de mitigação de carbono da infraestrutura verde: evidências do programa de cidades-esponja da China. | Hua Chai, Changqing Xu, Siyuan Peng, Yan Yan Xia, Hongtao Zhao, Yongwei Gong | 2026 | Cidade Esponja |
| Aplicação de pavimento de concreto permeável no projeto “Inspirar e expirar” para cidades-esponja na China. | Yu Huang ,Hao Sol ,Yu Hang Liu ,Kai Zhao ,Tong Liu, Dedi Liu | 2024 | Cidade Esponja Sistema de Drenagem Urbana Sustentável |
| Cidades esponja: estudo de caso aplicado no município do Rio de Janeiro | Ana Clara Vieira Pedrosa, Andréa Sousa da Cunha Fernandes | 2024 | Cidade Esponja |
| Árvores em Cidades-Esponja — Uma Revisão Sistemática das Árvores como Componente da Infraestrutura Azul-Verde, Princípios de Engenharia de Vegetação e Gestão de Águas Pluviais | Michael Richter, Kirya Heinemann, Nadine Meisere, Wolfgang Dickhaut | 2024 | Cidade Esponja Sistema de Drenagem Urbana Sustentável |
| Otimização do layout de baixo carbono e comparação de esquemas de instalações de drenagem urbana de baixo impacto (LID) em regiões áridas com base no NSGA-III | Yu Chang Shang, Jie Liu, Qiao Chen, Lirong Li | 2026 | Drenagem Urbana |
| Aprimorando a resiliência ecológica da água urbana por meio de iniciativas de cidades-esponja: Evidências da China | Paijie Wan, Hongjie Zhangb | 2026 | Cidade Esponja |

Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

As simulações desenvolvidas neste trabalho buscaram integrar o geoprocessamento com a análise hidrodinâmica, de modo a avaliar os impactos das inundações em Belo Horizonte e propor soluções de políticas urbanas mais resilientes. Nesse contexto, o espaço urbano é compreendido como resultado de processos dinâmicos que envolvem a interação entre natureza e sociedade, exigindo estratégias inovadoras de planejamento (Pereira Costa, 2006; Macedo, 2004).

1.5 Importância da interdisciplinaridade

Este estudo traz contribuições para o Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da UFMG (PPG- ACPS), pois dialoga diretamente com as linhas de pesquisa voltadas à sustentabilidade do ambiente construído, à resiliência urbana e ao planejamento territorial integrado. Sua abordagem interdisciplinar, que articula conhecimentos da arquitetura e urbanismo, das ciências ambientais, da geografia, da engenharia urbana e das geotecnologias, permite uma análise abrangente dos desafios enfrentados pelas cidades contemporâneas. Ao propor SbN e no uso de tecnologias espaciais, o trabalho contribui não apenas para o avanço científico, mas também para o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes, promovendo benefícios concretos para a sociedade e para a qualidade de vida urbana.

Além disso, o trabalho está inserido na linha de pesquisa Paisagem e Ambiente, com foco na análise da relação entre o conceito de cidades esponja e o sistema de drenagem urbana no contexto espacial, visando compreender a reabilitação dos rios à malha urbana. Dessa forma, fundamentado em uma abordagem integrada entre teoria e prática, o trabalho avançou para a apresentação do referencial teórico-

conceitual adotados na pesquisa a partir do conceito de cidades esponja e do geoprocessamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO-CONCEITUAL

2.1 CIDADES ESPONJA

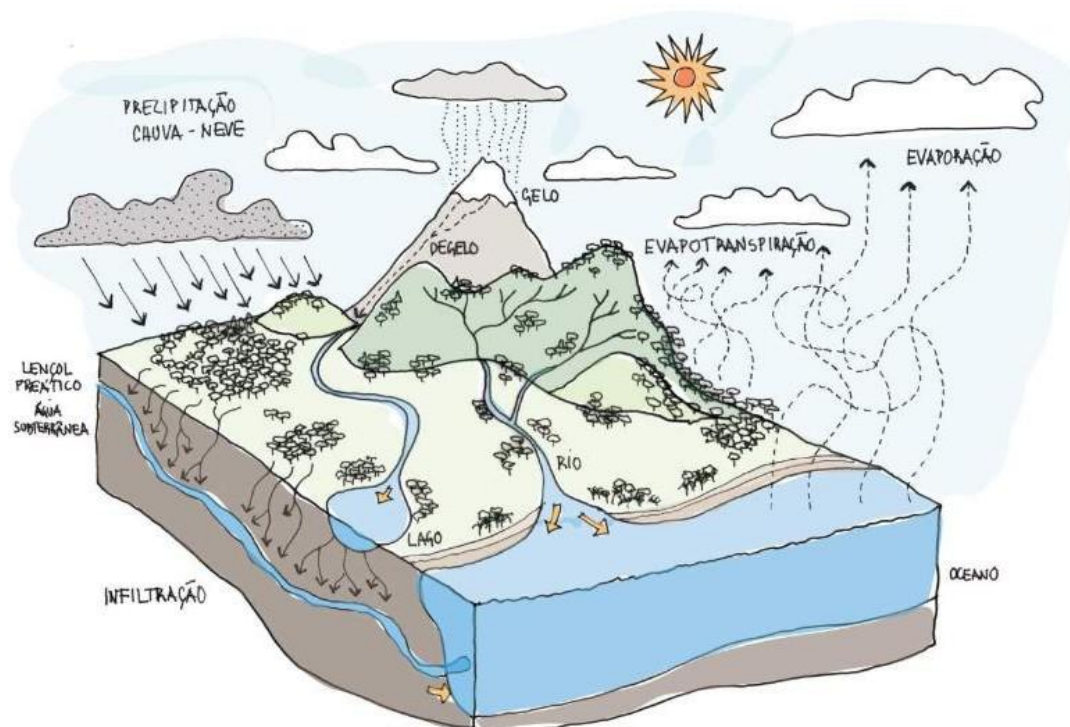
2.1.1 O Rio e a Cidade

Desde os tempos antigos, o crescimento e o desenvolvimento das cidades ocorreram majoritariamente às margens dos grandes rios, cuja presença era essencial para garantir recursos hídricos, transporte e a sobrevivência das populações. Com o domínio sobre a água, essas cidades se destacavam em relação àquelas que enfrentavam escassez hídrica. A relação entre os centros urbanos e os rios remonta a períodos anteriores à Revolução Pré-industrial, quando já existiam práticas como a construção de sistemas de drenagem, canais artificiais para desviar o fluxo natural dos rios e obras de canalização, revelando a importância estratégica da gestão hídrica desde as primeiras civilizações (Souza, 2020; Almeida e Carvalho, 2010).

A compreensão do comportamento da água é objeto da ciência hidrológica, que investiga suas interações com o solo, a atmosfera e os ecossistemas, além de seu percurso dentro do ciclo hidrológico (Castagna, 2023). Esse conhecimento é fundamental para o planejamento urbano, especialmente no confronto aos eventos como enchentes e inundações. Conforme Vilella e Mattos (1975), a hidrologia estuda a água terrestre em todos os seus aspectos: ocorrência, distribuição, circulação, propriedades físicas e químicas, bem como a sua relação com os seres vivos.

Em áreas urbanizadas com baixa permeabilidade do solo, o escoamento superficial amplia significativamente, reduzindo a capacidade dos rios de absorver o excesso de água pluvial, agravada pela sobrecarga da rede de esgoto. Com isso, o ciclo hidrológico (figura 4) é elemento essencial para essa ciência, pois permite compreender o comportamento das precipitações e do escoamento superficial (Vestena, 2008).

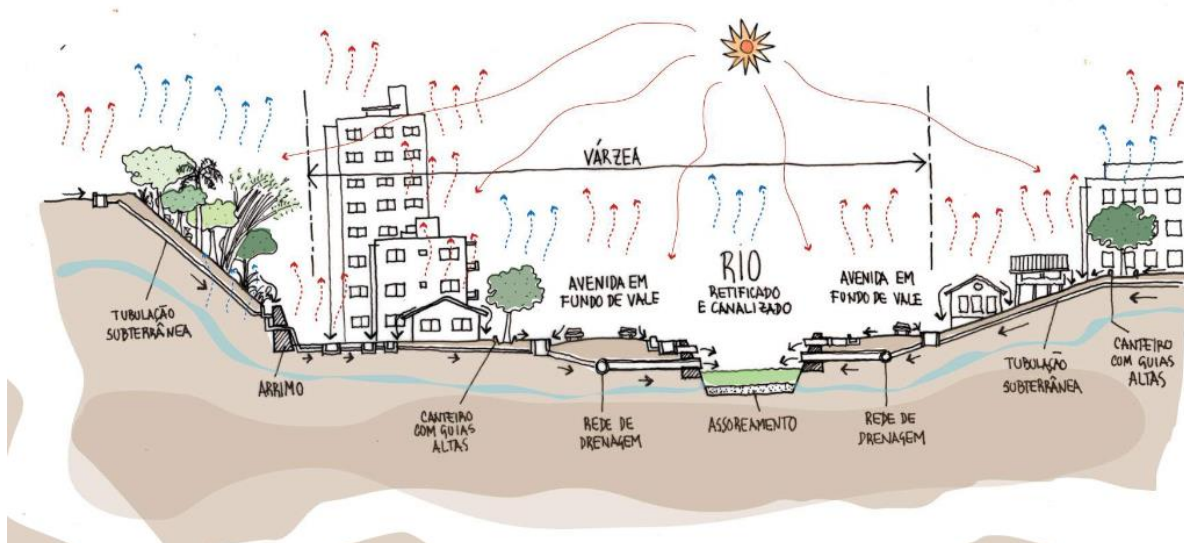
Figura 4 - Ciclo hidrológico da água



Fonte: Castagna, 2023.

A figura 5, apresentada por Castagna (2023), retrata um cenário urbano tradicional e amplamente encontrado nas cidades brasileiras, onde o rio foi retificado, canalizado e inserido em uma lógica de infraestrutura rígida e impermeável. O leito natural do curso d'água foi substituído por canais de concreto, que intensificam o escoamento superficial e reduzem a capacidade de infiltração no solo. As margens são ocupadas por avenidas de fundo de vale, estruturas de arrimo e edificações construídas próximas à calha do rio, aumentando a vulnerabilidade a enchentes. A drenagem urbana é conduzida por redes subterrâneas e tubulações, desconectadas dos processos naturais do ciclo da água, favorecendo o assoreamento e o acúmulo de sedimentos no leito fluvial. O ambiente mostra ausência de vegetação e espaços permeáveis, refletindo um modelo urbano que prioriza o controle técnico da água, como se observa na figura 5.

Figura 5 - Modelo convencional de urbanização e canalização dos rios

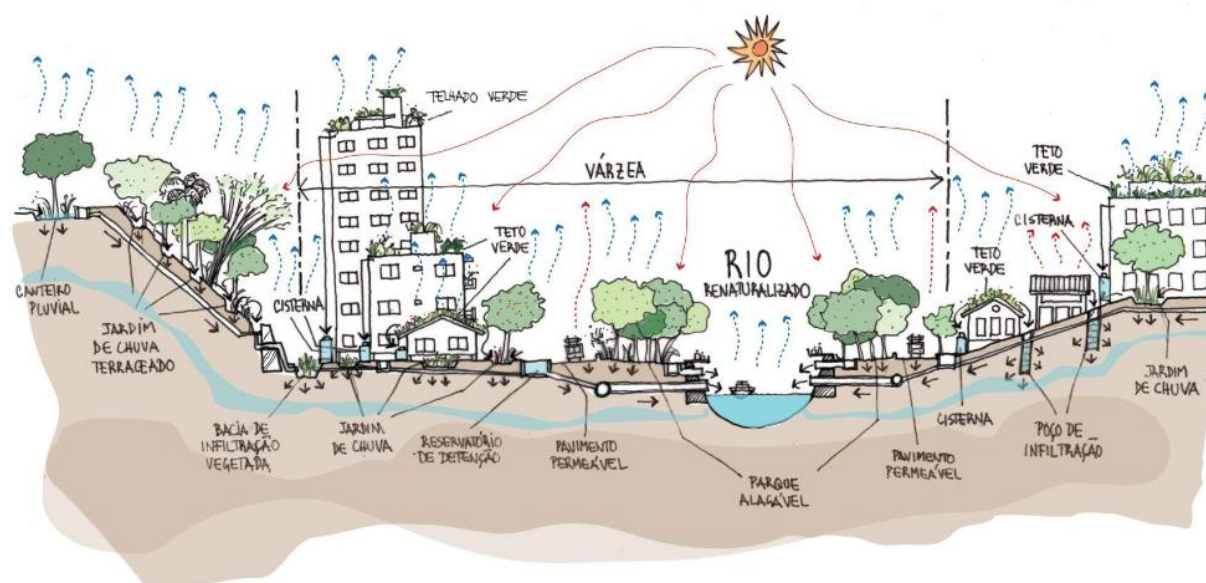


Fonte: Castagna, 2023.

A figura 6, também apresentada por Castagna (2023), ilustra um modelo urbano baseado na renaturalização dos rios e na aplicação de infraestruturas verdes, alinhado aos princípios das Cidades Esponja. Diferentemente do cenário anterior, observa-se a incorporação de soluções sustentáveis como telhados verdes, pavimentos permeáveis, jardins de chuva, bacias de infiltração, cisternas e parques alagáveis, que corroboram para a retenção, infiltração e reaproveitamento da água pluvial.

O rio, antes retificado e canalizado, agora é apresentado em seu curso renaturalizado, cercado por vegetação e integrado ao ambiente urbano. Essa abordagem demonstra a transição de uma infraestrutura cinza para uma infraestrutura verde e azul, promovendo maior equilíbrio ecológico, redução dos riscos de inundações e melhoria da qualidade ambiental urbana. A figura 6 representa, portanto, uma cidade resiliente que adota estratégias inspiradas na natureza para restaurar o ciclo hidrológico e reconectar a população com os cursos d'água.

Figura 6 - Modelo urbano com infraestrutura verde e renaturalização dos rios



Fonte: Castagna, 2023.

As figuras 5 e 6 apresentam dois cenários urbanos contrastantes que ilustram diferentes formas de lidar com os cursos d'água em áreas urbanizadas. O primeiro modelo (figura 5), representa uma realidade comum em diversas cidades brasileiras, onde os rios são canalizados, o solo é amplamente impermeabilizado, e as áreas de várzea são ocupadas por infraestrutura viária ou edificações. Esse modelo de ocupação ignora os processos naturais do ciclo hidrológico e intensifica problemas como o assoreamento, as enchentes e a degradação ambiental, tornando o ambiente urbano mais vulnerável a eventos climáticos extremos.

Em contrapartida, a figura 6 propõe um cenário sustentável e resiliente, fundamentado na renaturalização dos rios e na adoção de estratégias de infraestrutura verde. Nessa configuração, são incorporados elementos como jardins de chuva, telhados verdes, pavimentos permeáveis, parques alagáveis e reservatórios de detenção, que têm como objetivo restaurar a dinâmica natural da água no território urbano. Essa abordagem busca promover maior permeabilidade do solo com vegetação, facilitar a infiltração da água da chuva e reduzir os impactos das cheias, além de qualificar os espaços públicos e integrar a vegetação à paisagem urbana (Castagna, 2023; Zeng et al., 2024).

A vegetação arbórea atua diretamente na retenção das águas pluviais por meio de diferentes mecanismos complementares: a interceptação da chuva pela copa, que reduz a energia cinética da precipitação e retarda sua chegada ao solo; a infiltração favorecida pela estrutura radicular; a absorção de água pelas raízes, posteriormente redistribuída via transpiração (Evert; Eichhorn, 2014; Taiz et al., 2017). A chamada capilaridade, nesse contexto, refere-se à capacidade do sistema radicular de explorar microporos do solo, promovendo a ascensão e a redistribuição da água nos horizontes superficiais e subsuperficiais, além de ampliar a porosidade e a permeabilidade do solo ao longo do tempo.

Árvores de maior porte, por apresentarem raízes mais profundas e extensas (figura 7), aumentam significativamente a capacidade de armazenamento hídrico do solo e contribuem para a estabilização do lençol freático, desempenhando papel estratégico na redução do escoamento superficial e no amortecimento de picos de cheia (Taiz et al., 2017; Forman e Godron, 1986). Assim, a incorporação criteriosa da vegetação arbórea não se limita a um recurso paisagístico, mas constitui um elemento técnico essencial para a eficiência hidrológica e a resiliência ambiental das intervenções propostas no âmbito do projeto de cidade esponja.

Figura 7 – Esquema do papel das árvores na absorção e retenção da água da chuva



Fonte: Castagna, 2023.

As propostas ilustradas encontram respaldo em importantes referências teóricas. Segundo McHarg (1992), o planejamento urbano deve ser orientado pela leitura ecológica do território, reconhecendo os rios e as demais estruturas naturais como elementos essenciais para a organização do espaço urbano. As decisões urbanísticas devem respeitar os fluxos naturais da água e a topografia, favorecendo soluções que mantenham ou recuperem a integridade dos sistemas ecológicos. As cidades devem respeitar a lógica natural das paisagens, considerando os rios como

elementos estruturantes e não como obstáculos ao desenvolvimento (McHarg, 1992).

Segundo Spink (2006), deve-se avaliar a forma como os espaços públicos são apropriados e transformados pelas dinâmicas de impermeabilização e exclusão ambiental nas cidades. Ela defende uma reconfiguração do espaço urbano com base em uma maior integração entre natureza e infraestrutura, destacando o papel da vegetação e da água na constituição de uma paisagem urbana mais sensível e inclusiva. Essa abordagem está em consonância com os conceitos aplicados nas chamadas “cidades esponja”, que vêm sendo implementadas em diversas metrópoles ao redor do mundo, onde, no qual a água e a vegetação têm papel central na construção de ambientes mais saudáveis e humanizados.

Os conceitos de Forman (2019) ao tratar da Ecologia da Paisagem aplicada ao planejamento urbano, enfatizam a importância de integrar os sistemas naturais ao ambiente construído, promovendo a conectividade ecológica e o funcionamento dos processos hidrológicos nas cidades. De forma complementar, Cormier e Pellegrino (2008) reforçam a necessidade de estratégias que articulem infraestrutura verde e planejamento ecológico urbano, com foco na conservação da biodiversidade e na regulação dos fluxos hídricos.

Nesse sentido, a comparação entre os dois cenários evidencia a necessidade urgente de repensar o modelo tradicional de urbanização. A renaturalização dos rios não é apenas uma estratégia técnica para a gestão sustentável das águas pluviais, mas também uma prática política, social e ecológica. Ao integrar os princípios defendidos por McHarg (1992), Spink (2006), Forman (2019), Cormier e Pellegrino (2008), as SbN fortalecem o conceito de cidades esponja e promovem um planejamento urbano mais sensível às questões climáticas, à valorização da paisagem e à qualidade de vida.

A análise comparativa dos cenários evidencia a importância de integrar a natureza às políticas públicas, especialmente no contexto da gestão das águas. Essa reflexão introduz o Programa Cidades Esponja, uma estratégia inovadora que propõe SbN para tornar as cidades mais resilientes às inundações e às mudanças climáticas. A seguir, será apresentada essa abordagem, com suas diretrizes e com o potencial de aplicação em contextos urbanos nacionais e internacionais.

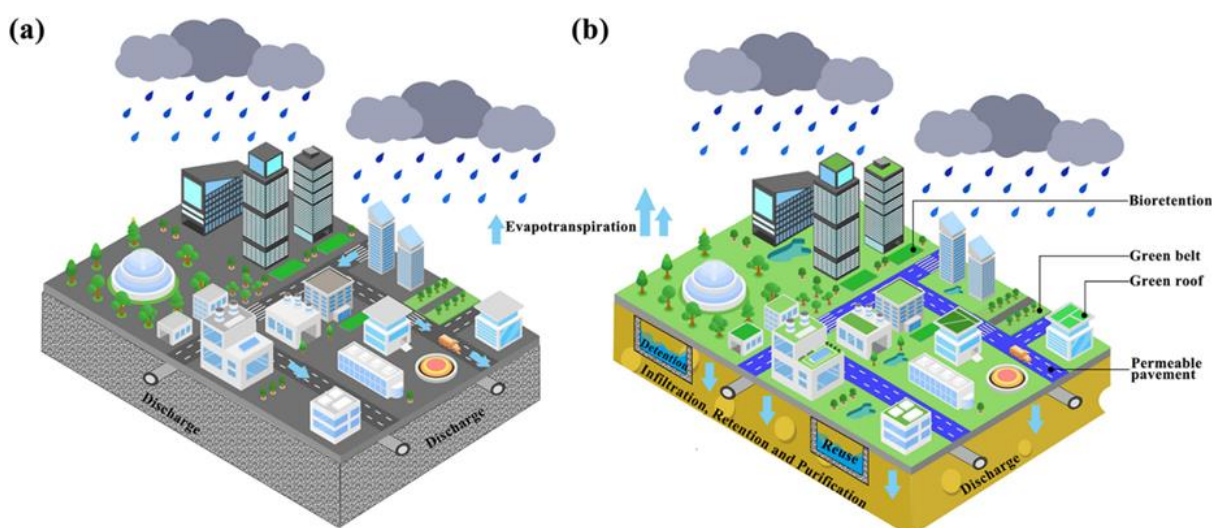
2.2 SPONGE CITY PROGRAM (PROGRAMA CIDADES ESPONJA)

A abordagem teórica do trabalho aprofunda a contextualização do conceito de cidades esponja, adotado na China desde 2013 (Asian Development Bank, 2022), na época como política nacional tornando visível a arquitetura paisagística e medidas sustentáveis para o enfrentamento das mudanças climáticas. As cidades esponja priorizam infraestruturas em ampla escala baseadas na natureza, abordando as zonas úmidas, corredores verdes, parques, proteção de árvores e bosques, jardins de chuva, telhados verdes, pavimentos permeáveis e biovaletas na paisagem nas cidades.

Segundo Yin et al. (2021), o programa substitui infraestruturas convencionais, caracterizadas por superfícies impermeáveis de concreto e asfalto, por soluções baseadas na natureza, promovendo a infiltração, retenção, detenção, purificação, reutilização e liberação gradual da água pluvial. Para isso, são adotadas estratégias como sistemas de drenagem urbana sustentáveis, pavimentação permeável, bacias de bioretenção (Moura, 2014) e telhados verdes (Baldessar, 2012), que contribuem para o incremento da evapotranspiração e a melhoria do microclima local.

A Figura 8 apresenta um diagrama comparativo entre duas abordagens urbanas: a primeira (a) representa uma cidade com alto escoamento superficial da água pluvial, enquanto a segunda (b) ilustra a aplicação de infraestruturas verdes, que favorecem a retenção e a purificação da água da chuva.

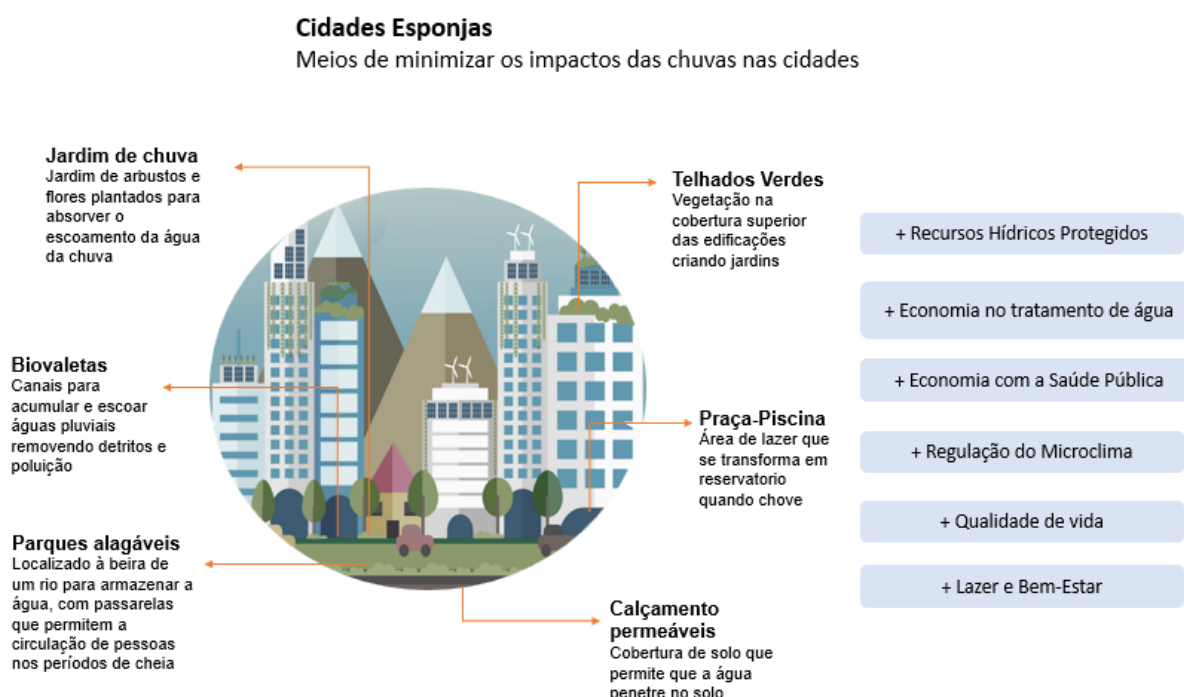
Figura 8 - Diagrama comparativo entre as infraestruturas cinza e verdes



Fonte: Yin et al, 2021.

Na figura 8 os principais meios são apresentados para a implantação em uma cidade para minimizar os impactos das chuvas nas cidades como os jardim de chuvas, biovaletas, parques alagáveis, telhados verdes, praça-piscina e calçamento permeáveis. Estes são construídos com o intuito de proporcionar as cidades a proteção dos recursos hídricos, o tratamento de água e a regulação do microclima no meio urbano.

Figura 9 – Meios utilizados para implantação de uma cidade esponja



Fonte: Ciclo Vivo, 2022; G1, 2020, adaptado pela autora, 2023.

Ainda, Zhou et al. (2018) afirmam que uma simulação do modelo de cidade esponja deverá ser necessária para compreender a capacidade de controle de inundações dessas cidades, para que auxiliem os gestores planejar políticas públicas nas cidades.

A seguir apresenta-se conceitualmente os meios que minimizam os impactos da chuva nas cidades esponja.

2.2.1 Jardins de Chuva

Os jardins de chuva são estruturas fundamentadas em SbN que promovem a biorretenção da água pluvial, favorecendo sua infiltração no solo por meio de vegetação específica e camadas de materiais permeáveis. Esses sistemas

contribuem significativamente para a redução do escoamento superficial e o acréscimo da recarga do lençol freático, além de possibilitarem a liberação gradual da água para os sistemas convencionais de drenagem. Dessa forma, ajudam a controlar inundações urbanas ao reter grandes volumes de água em curtos períodos de tempo (Belo Horizonte, 2024a).

Os jardins de chuva funcionam como sistemas de biorretenção estruturados por cavidades preenchidas com materiais granulares, favorecendo a infiltração e o tratamento das águas pluviais (Moura, 2014; Carvalho, 2021). Estas cavidades formam uma estrutura porosa, permitindo a infiltração lenta da água e sua absorção pelas raízes das plantas, sendo posteriormente devolvida ao ciclo hidrológico por evapotranspiração.

Essas estruturas não apenas reduzem a sobrecarga nos sistemas de drenagem urbana, mas também desempenham funções ecológicas importantes, como a filtragem de poluentes, melhoria da qualidade da água e aumento da umidade atmosférica. Ao possibilitarem o contato da água da chuva com o solo e a vegetação, os jardins de chuva ajudam na restauração do ciclo hidrológico e na mitigação dos impactos das enchentes, alagamentos e inundações nas cidades (Castagna, 2023). Dessa forma, representam uma alternativa sustentável e eficiente no contexto do manejo urbano da água, promovendo benefícios ambientais e contribuindo para a resiliência das cidades frente aos eventos climáticos extremos.

Os jardins de chuva apresentam uma variedade de formas e configurações, que alteram conforme as especificidades do projeto em que serão aplicados. Podem ser implantados diretamente sobre o solo natural ou integrados a sistemas de drenagem permitindo a inclusão de diversos componentes, como guias ao redor da estrutura, camadas de substratos específicos, pedras com granulometrias distintas que formam uma base porosa, além de revestimentos impermeáveis conectados ao sistema convencional de escoamento pluvial (figura 10) (Castagna, 2023).

Figura 10 - Estrutura de um jardim de chuva



Fonte: Castagna, 2023.

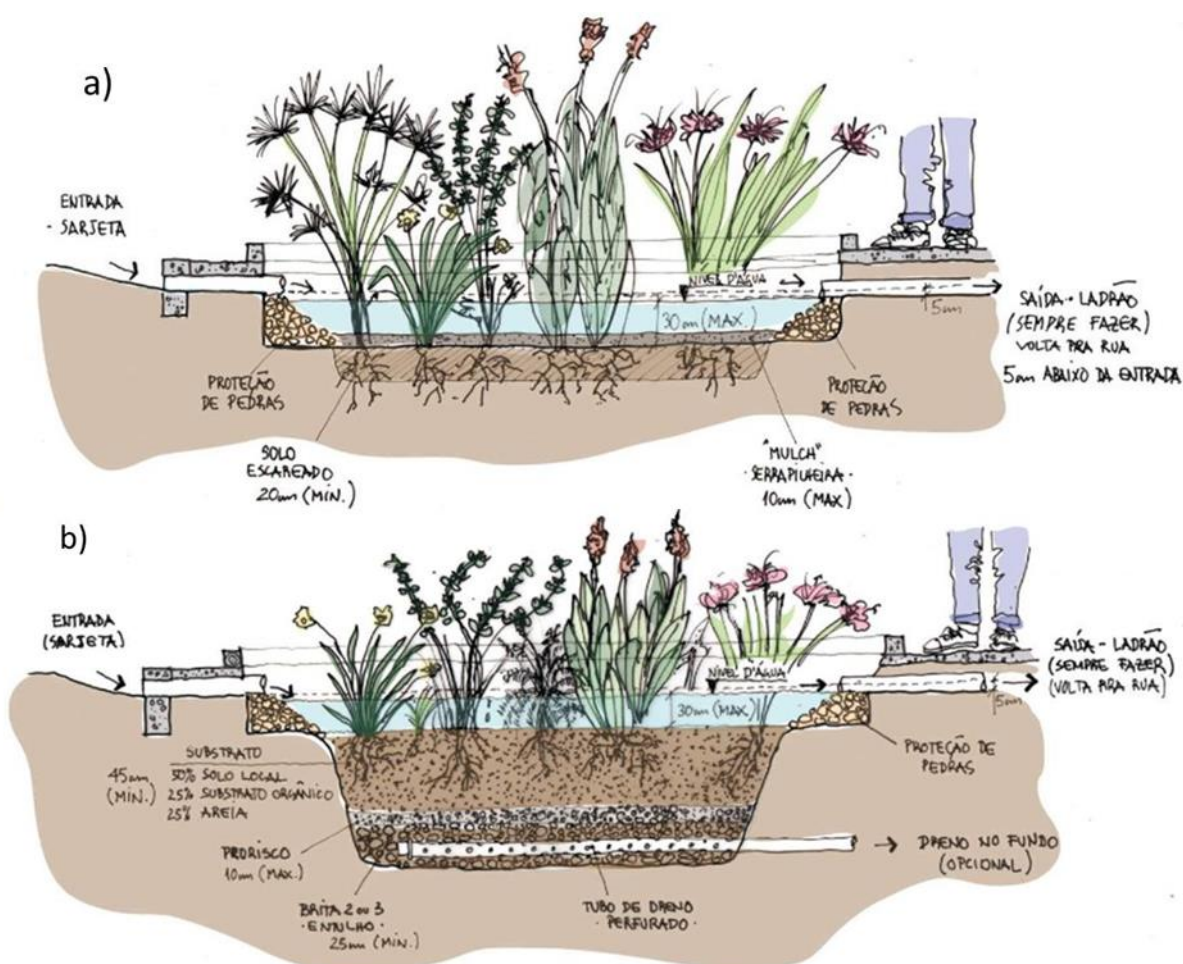
Segundo Castagna (2023), esses jardins podem ser classificados em dois tipos principais:

1. **Jardins sobre o solo natural** – são soluções de baixo custo e execução simples, apropriadas para áreas com solo naturalmente permeável, onde a água da chuva pode ser absorvida diretamente.
2. **Jardins sobre rede de drenagem** – possuem estrutura mais complexa e profunda, com maior capacidade de retenção e tratamento da água, sendo mais adequados para contextos urbanos com alta impermeabilização do solo.

Na figura 11, apresenta-se um corte esquemático que ilustra os dois tipos de implementação:

- (a) diretamente sobre o solo natural e (b) interligado a um sistema de drenagem.

Figura 11 - Corte esquemático com as diferentes camadas do jardins de chuva: em solo natural(a) e mais profundo com maior capacidade de retenção da água conectado ao sistema de drenagem (b)



Fonte: Castagna, 2023.

A figura 12 ilustra um exemplo de aplicação desse tipo de infraestrutura na cidade de Belo Horizonte.

Figura 12 - Jardins de chuva implantados na cidade de Belo Horizonte



Fonte: Jornal Estado de Minas, 2024.

O jardim de chuva consiste em área vegetada com espécies adaptadas a condições climáticas variáveis, capazes de suportar períodos de estiagem e precipitações intensas. No projeto paisagístico, as espécies devem apresentar potencial de fitorremediação, contribuindo para absorção e retenção de poluentes da água pluvial. Recomenda-se vegetação de porte baixo a médio, com boa cobertura do solo e resistência ao escoamento superficial, assegurando estabilidade e eficiência do sistema (Belo Horizonte, 2024a). Quanto ao funcionamento hidráulico, entradas e saídas de água devem ser protegidas com materiais pétreos, como pedras ou britas, a fim de reduzir processos erosivos e preservar a integridade estrutural do dispositivo adequada (figura 13).

Figura 13 - Camada de brita na entrada e saída do fluxo do volume de água no jardim



Fonte: Belo Horizonte, 2024a.

Para incentivar a construção de áreas permeáveis a Prefeitura de Belo Horizonte promoveu o programa “Adote um Jardim de Chuva” com o intuito de incentivar a implantação de mais jardins pela cidade. A medida garante descontos de 10% no valor do IPTU, limitado até R\$ 2 mil reais, para os moradores que adotarem os jardins implantados na cidade e que auxiliariam na absorção e na redução do escoamento da água da chuva em tempos de emergência climática (Belo Horizonte, 2024). Entretanto, o abandono dos jardins de chuva em Belo Horizonte, marcado pelo acúmulo de mato e pela ausência de manutenção contínua, evidencia não apenas a fragilidade das políticas públicas de gestão das infraestruturas verdes, mas também a falta de engajamento comunitário em preservar um equipamento urbano essencial para reduzir alagamentos e qualificar o espaço público (MG2, 2025).

2.2.2 Biovaletas

As biovaletas, também conhecidas como valetas de biorretenção com vegetação, têm como principal função promover a purificação da água pluvial, prolongando seu tempo de escoamento até os jardins de chuva ou reservatórios de detenção. Essas estruturas, semelhantes aos jardins de chuva, apresentam depressões lineares compostas por vegetação, solo e outros elementos filtrantes, conforme descrito por Cormier e Pellegrino (2008).

As suas estruturas devem ser compostas por vegetações com propriedades filtrantes, capazes de remover os poluentes da água pluvial adquiridos durante o

escoamento pelas vias urbanas, reduzindo o risco de contaminação do solo após a infiltração. Além disso, as plantas presentes nessas estruturas contribuem para um escoamento mais lento e eficiente. A escolha das espécies deve considerar características como rápido crescimento, resistência a variações de pH, alta capacidade de transpiração e facilidade de plantio, garantindo a adaptação e eficácia do sistema (Teixeira e Silva, 2019; Souza, 2022).

Por serem menores que os jardins de chuva, as biovaletas são geralmente dispostas próximas umas das outras, formando uma série contínua com o propósito de minimizar o escoamento superficial (Cormier e Pelegrino, 2008). Elas se caracterizam como valas naturais de drenagem que abrigam espécies vegetais adaptadas à umidade, capazes de prosperar mesmo em condições de inundação, garantindo assim maior eficiência na retenção e filtragem da água da chuva (Cormier e Pelegrino, 2008). Na figura 14 apresenta-se um exemplo em um estacionamento.

Figura 14 - Biovaleta do estacionamento do New Seasons Market em Portland, Oregon



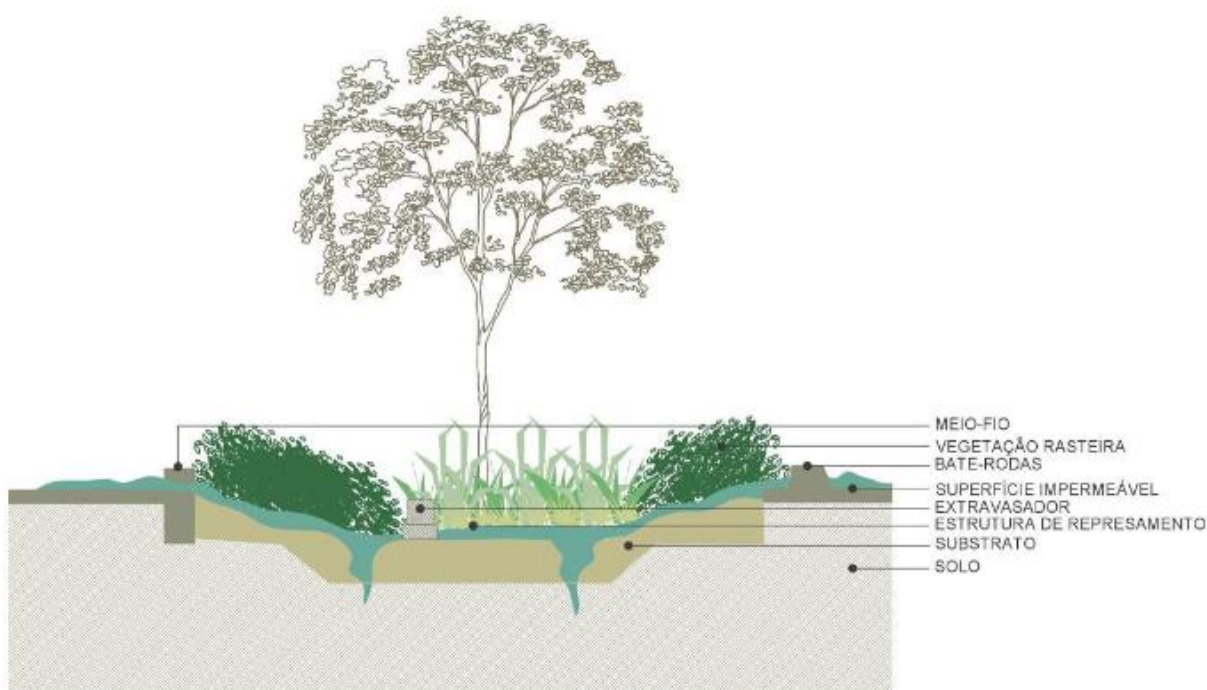
Fonte: Cormier E Pellegrino, 2008.

Na figura 15 apresenta-se um esquema de uma biovaleta, destacando suas camadas estruturais e componentes principais. Elas podem ser caracterizadas por diversas camadas que promovem a infiltração e filtração da água pluvial. Na parte

superior, o meio-fio delimita a área e direciona o escoamento, enquanto a vegetação rasteira contribui para a retenção de sedimentos e evapotranspiração (Cormier e Pelegrino, 2008).

A estrutura de represamento garante a retenção temporária da água, permitindo uma infiltração gradual, enquanto o substrato, composto por solo poroso e materiais granulares, facilita a drenagem. Na base, o solo recebe a água infiltrada, no centro da biovaleta, pode haver vegetação arbustiva ou arbórea que contribui para a absorção hídrica pelas raízes e a evapotranspiração, além de proporcionar sombra, tornando o sistema eficiente no manejo sustentável das águas pluviais em áreas urbanas. A figura 16 apresenta as camadas de uma biovaleta: solo, substrato, estrutura de represamento, extravasador, superfície impermeável, bate-rodas, vegetação rasteira e meio-fio (Teixeira e Silva, 2019; Souza, 2022).

Figura 15 - Estrutura de uma Biovaleta



Fonte: Teixeira e Silva, 2019; apud Bonzi, 2015.

2.2.3 Telhados Verdes

Os telhados verdes são sistemas instalados sobre as coberturas de edificações, compostos por diversas camadas que permitem o cultivo de vegetação sem comprometer a estrutura da construção. Esses sistemas auxiliam significativamente

na absorção da água da chuva, contribuindo para o controle do escoamento superficial nos centros urbanos (Baldessar, 2012).

As camadas que os compõem geralmente incluem uma laje com inclinação para escoamento, uma membrana impermeabilizante, uma camada de drenagem, solo, substrato e a vegetação. Em áreas mais sensíveis à umidade, é comum a adição de uma membrana líquida extra para reforçar a impermeabilização, direcionando o excedente de água a sistemas de drenagem cinza (Baldessar, 2012).

Os telhados verdes têm origem milenar, remontando a cerca de 2.500 a.C., na Mesopotâmia, onde eram empregados em templos religiosos conhecidos como Zigurates. Posteriormente, na Babilônia, destacaram-se nos famosos Jardins Suspensos, considerados uma das sete maravilhas do mundo antigo e reconhecidos como um marco histórico das práticas ambientais associadas à arquitetura (Osmundson, 1999; Almeida, Brito e Santos, 2018; Morais et al., 2021, Morais, 2022).

Além de seu papel no manejo sustentável da água pluvial, os telhados verdes também oferecem benefícios térmicos às edificações, bem como a eficiência energética dos edifícios, superando os resultados obtidos com sistemas convencionais, conforme destacado por Sousa et al. (2021). Isso ocorre devido à capacidade das camadas vegetadas de absorver calor, reter umidade e promover o isolamento, resultando em ambientes internos mais confortáveis e com menor necessidade de climatização artificial. Na figura 16 um exemplo de telhado verde na capital mineira.

Figura 16 - Telhado verde com vegetação forrageira na cidade de Belo Horizonte



Fonte: Prefeitura de Belo Horizonte (PBH), 2017.

Os telhados verdes apresentam variações de espessura conforme a função e o volume de água pluvial que se pretende reter. Os sistemas com maior capacidade de captação possuem entre 20 e 60 cm de profundidade, enquanto os mais rasos, voltados para menor retenção, variam entre 5 e 15 cm (Morais, 2022). Na figura 17 apresenta-se um exemplo das camadas de um telhado verde.

Figura 17 - Camadas de um telhado verde



Fonte: Morais, 2022 adaptado de Vijayaraghavan, 2016.

As coberturas verdes oferecem múltiplos benefícios ambientais e urbanos, que vão desde a diminuição do efeito de ilhas de calor e a melhoria do microclima até a redução do consumo de energia, a atenuação da poluição sonora e o aumento da qualidade e da umidade do ar. Além disso, possibilitam o reaproveitamento da água da chuva, contribuem para a mitigação de inundações por meio da microdrenagem. Tais estruturas também reforçam o paisagismo e ampliam a arborização nos centros urbanos, consolidando-se como soluções estratégicas de infraestrutura verde (Alberto et al, 2012; Berardi et al., 2014; Mendonça e Melo, 2017; Nunes et al., 2017; Morais, 2022).

Outro aspecto importante está no potencial das coberturas verdes para promover a agricultura urbana, contribuindo tanto para a sustentabilidade quanto para a segurança alimentar. Um exemplo significativo é o projeto *Carrot City*, originalmente concebido em Toronto, no Canadá e, posteriormente, difundido para diversas cidades ao redor do mundo (Komisar e Nasr, 2019). O projeto desses autores, que trabalha com arquitetura, planejamento e design urbano reúne experiências e propostas inovadoras de produção de alimentos em telhados e outros espaços urbanos. A iniciativa mostra como a integração entre design, arquitetura e agricultura

pode transformar áreas impermeabilizadas em sistemas produtivos, fortalecendo o papel das cidades na construção de um ambiente mais resiliente e sustentável (Komisar et al, 2011). Na figura 18, os telhados verdes são a iniciativa de agricultura urbana *Carrot City*.

Figura 18 - Telhados verdes com agricultura urbana *Carrot City*



Fonte: Komisar et al, 2011.

2.2.4 Praças-Piscinas

A praça-piscina representa uma alternativa econômica e eficiente para o controle da água da chuva, especialmente em áreas urbanas suscetíveis a alagamentos. Esses espaços públicos são projetados para acumular temporariamente grandes volumes de águas pluviais, liberando-os gradualmente para o solo, o que contribui tanto para a recarga dos lençóis freáticos quanto para a redução da sobrecarga em sistemas

de drenagem (Hoyer et al., 2011). Além da função hidráulica, as praças-piscinas também oferecem áreas de lazer e convivência à população, unindo infraestrutura verde com espaços urbanos acessíveis e multifuncionais.

Um exemplo emblemático desse tipo de solução é a praça-piscina Barragem Santa Lúcia, localizada em Belo Horizonte (figura 19). O local conta com um grande espelho d'água e diversas áreas recreativas ao seu redor, incluindo quadras esportivas e áreas vegetadas projetadas para serem inundáveis quando necessário. De acordo com Borsagli (2011), a barragem instalada nesse espaço atua como reguladora das cheias do córrego Leitão, que segue seu curso sob a Avenida Prudente de Moraes, auxiliando na prevenção de enchentes e na gestão eficiente das águas pluviais.

Figura 19 - Praça-Piscina com água acumulada na parte com cota inferior as demais



Fonte: G1, 2021.

Entretanto, no início de 2024, a Barragem Santa Lúcia sofreu um episódio de transbordamento nas áreas adjacentes, arrastando diversos carros pelas ruas e causando grandes prejuízos (Ricci e Vasconcelos, 2024). Diante do ocorrido, a prefeitura decidiu esvaziar a barragem para investigar as causas e realizar obras de melhoria no sistema de drenagem. Esse episódio evidencia a importância da manutenção e do monitoramento contínuo dos sistemas de mitigação de inundações na cidade.

2.2.5 Pavimentos Permeáveis

Os pavimentos permeáveis, também conhecidos como calçamentos permeáveis, são estruturas aplicadas em coberturas e superfícies pavimentadas que possibilitam a infiltração da água no solo. Eles são formados por materiais especialmente selecionados para garantir a porosidade necessária, permitindo que a água penetre facilmente. Esses materiais apresentam diferentes granulometrias, o que favorece a criação de vazios entre as peças, ampliando a capacidade de absorção hídrica do pavimento (Souza et al, 2025).

A diversidade granulométrica dos elementos que compõe o calçamento permeável é essencial para aumentar os espaços vazios, que atuam como reservatórios temporários para a água da chuva. Essa característica torna os pavimentos permeáveis eficientes na retenção e condução da água para o solo, contribuindo para o manejo sustentável das águas urbanas. Assim, sua implantação é uma estratégia importante para as cidades esponja, pois auxilia na redução do escoamento superficial e promove a recarga do lençol freático em áreas urbanas (Souza et al, 2025; Souza, 2020).

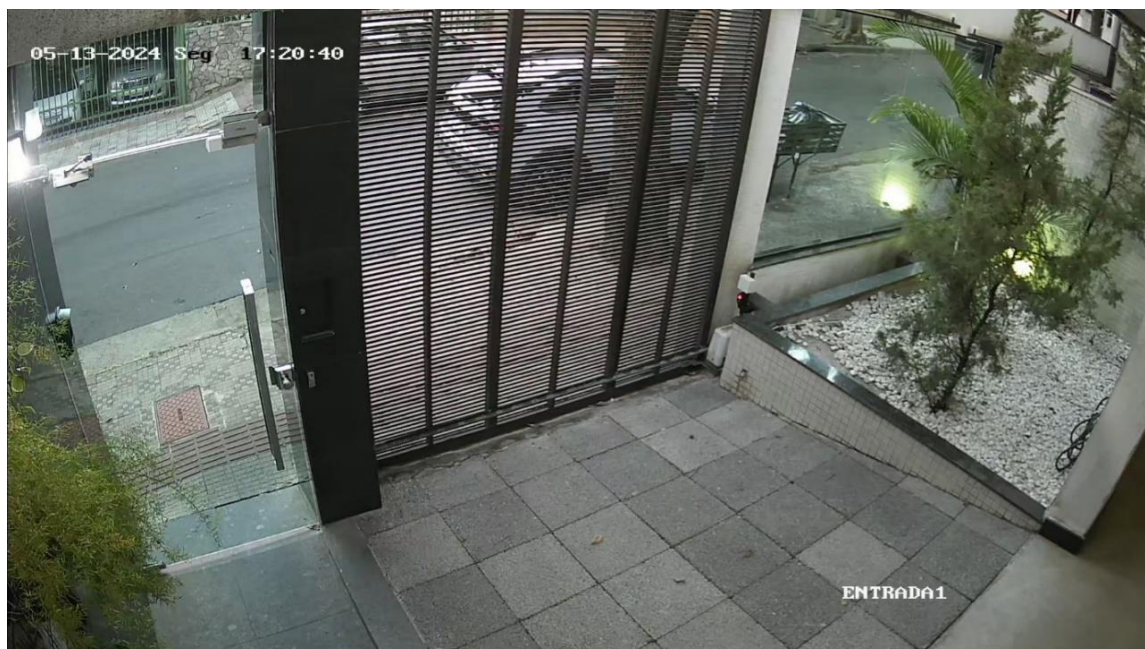
Na figura 20, é possível observar uma comparação entre diferentes tipos de pavimentos permeáveis, evidenciando a sua permeabilidade em relação ao calçamento tradicional de concreto. A figura 21 apresenta um exemplo prático da aplicação desses pavimentos em um hall de entrada de edifício, demonstrando como essa tecnologia pode ser incorporada no ambiente urbano, aliando funcionalidade e sustentabilidade.

Figura 20 - Comparação da porosidade do calçamento permeável com o calçamento de concreto



Fonte: Revista Universidade, 2019.

Figura 21 - Piso permeável na entrada de um prédio em Belo Horizonte



Fonte: Costa, 2024.

2.2.6 Parques Alagáveis

Os parques alagáveis são concebidos estrategicamente às margens de cursos d'água, com o objetivo de absorver volumes elevados de precipitação durante os

períodos de cheias (Muñoz et al., 2024). Esses espaços funcionam como áreas de retenção natural, utilizando solos com alta permeabilidade, pavimentos que permitem a infiltração da água, mobiliários urbanos resistentes à umidade e vegetações adaptadas, capazes de auxiliar na absorção e no controle do escoamento pluvial.

Um exemplo dessa abordagem pode ser visto na figura 22, que apresenta o projeto do *Parque Haikou Fengxiang*, localizado na cidade de *Haikou*, na província de *Hainan*, China. O projeto promoveu a revitalização de um rio degradado, anteriormente cinzento e poluído, por meio da criação de uma infraestrutura verde-azul. Esse sistema integra o tratamento de esgoto a um conjunto de soluções ecológicas que restauram a qualidade da água e revitalizam o ambiente urbano, ao mesmo tempo em que oferecem espaços públicos qualificados que favorecem a convivência e o uso social da área.

Figura 22 - Parque alagável de Haikou Fengxiang



Fonte: Great Garden Soft. The World, 2019.

O arquiteto paisagista *Kongjian Yu* era reconhecido no cenário internacional por sua contribuição fundamental ao conceito de cidades esponja (Yu et al, 2015). Fundador do escritório *Turenscape*, *Yu* se destacou ao longo de seus 25 anos de carreira por seu trabalho voltado à restauração ecológica e à defesa das infraestruturas verdes nas cidades. Suas pesquisas abordavam temas como infraestrutura ecológica, planejamento urbano negativo e estratégias de adaptação urbana para o

enfrentamento de inundações (Florian, 2023). Ele também teve papel central na formulação e implantação de políticas públicas na China, liderando projetos de recuperação ambiental em áreas urbanas degradadas.

Conforme relatado por *Braun (2024)*, *Kongjian Yu* descreve o conceito de cidades esponja como um sistema dinâmico no qual o rio funciona como uma “escada viva”, em constante adaptação, permitindo à natureza regular o fluxo da água. Essa abordagem já foi implementada em mais de 70 cidades ao redor do mundo e se fundamenta em três princípios essenciais:

- O primeiro consiste em reter a água da chuva no momento em que ela toca o solo, destinando cerca de 20% da área urbana para retenção, por meio de reservatórios e áreas verdes próximas aos cursos d’água, prevenindo o escoamento direto para os rios principais.
- O segundo princípio refere-se à redução da velocidade do fluxo hídrico nos rios, possibilitando que a natureza tenha tempo de absorver essa água. Isso é alcançado através da reconfiguração dos corpos d’água, recriando meandros naturais e utilizando vegetação nativa para revitalizar as margens, além da criação de lagos que atuam como zonas de contenção.
- O terceiro e mais crucial princípio envolve a adaptação das cidades para conviver com áreas alagáveis. Isso implica o desenvolvimento de estruturas naturais capazes de reter a água temporariamente, favorecendo sua posterior infiltração no solo e recarga do lençol freático. Yu destaca que a canalização dos rios com concreto nas áreas urbanas acelera o escoamento, agravando os efeitos das chuvas intensas (*Braun, 2024*).

As soluções propostas por *Yu et al. (2015)* inserem-se em uma política pública abrangente, cuja eficácia depende de sua implementação de forma articulada e sistêmica. Quando aplicadas de maneira pontual ou isolada, essas estratégias tendem a gerar impactos limitados. Nesse sentido, *Zhou et al. (2018)* destacam a importância do uso de modelos computacionais para simulações hidrológicas como forma de avaliar a efetividade do Programa de Cidades Esponja (*Sponge City Program – SCP*).

Estas simulações são fundamentais para mensurar o potencial de mitigação de

enchentes, fornecendo embasamento técnico para decisões voltadas ao planejamento urbano sustentável. Paralelamente, o uso de ferramentas de geoprocessamento revela-se essencial na construção e análise de modelos preditivos, fortalecendo a capacidade de gestão das águas pluviais em contextos urbanos complexos.

2.3 GESTÃO SUSTENTÁVEL DA ÁGUA

Os conceitos de desenvolvimento sustentável ganham destaque principalmente pelas ações antrópicas na natureza que resultam em mudanças climáticas extremas. Diante disso, os países buscam enfrentar os desafios relacionados à sustentabilidade da água e da energia, com o intuito de reconectar o ambiente urbano com a natureza. Com isso, projetos voltados para as SbN se destacam ao fornecer benefícios sociais, econômicos e ambientais com a melhoria da resiliência e sustentabilidade urbana com a restauração de ecossistemas urbanos por meio de intervenções locais (Qi et al, 2020).

De acordo com a Comissão Europeia (CE), as SbN têm como principais metas promover uma urbanização sustentável, restaurar ecossistemas degradados, enfrentar e mitigar os impactos das mudanças climáticas, além de fortalecer a resiliência e aprimorar a gestão de riscos (Qi et al, 2020). É importante compreender o papel das SbN na adoção da gestão ambiental, principalmente garantindo os recursos e processos para manter o ciclo da água urbana, melhorar a qualidade e garantir o gerenciamento de riscos de inundação.

O conceito de SbN surge como um programa ecológico sistêmico no qual outros programas foram precursores. Nos anos 70, na América do Norte surgia o conceito de Melhores Práticas de Gestão (*BMPs*) introduzindo abordagens baseadas na natureza orientando arquitetos e planejadores urbanos nos Estados Unidos da América (EUA) (Qi et al, 2020).

A partir de 1990, no Reino Unido os Sistemas de Drenagem Sustentável (*SuD*s) tornam-se cada vez mais difundidos como soluções técnicas que auxiliam no gerenciamento e drenagem das águas superficiais para proporcionar vários benefícios como o monitoramento dos riscos de inundação, melhoria na qualidade da água e garantia da biodiversidade. No início da década de 90, surgiu nos Estados

Unidos e na Nova Zelândia o Desenvolvimento de Baixo Impacto (*LID*) que propõe a implementação de estruturas para controlar o escoamento de águas pluviais de forma descentralizada (Qi et al, 2020).

Na mesma época, na Austrália surgiu *Water Sensitive Urban Design (WSUD)*, uma abordagem de planejamento que integra o ciclo urbano da água de forma sensível com as águas pluviais subterrâneas, com gestão e abastecimento. Na Nova Zelândia através da junção entre o *LID* e o *WSUD* surge o *Low Impact Urban Design and Development” (LIUDD)* que é um processo integrado de design urbano que, com foco nas bacias hidrográficas, busca mitigar impactos ambientais, sociais e econômicos do desenvolvimento convencional, promovendo soluções de baixo custo e impacto (Qi et al, 2020; Chan et. al, 2018).

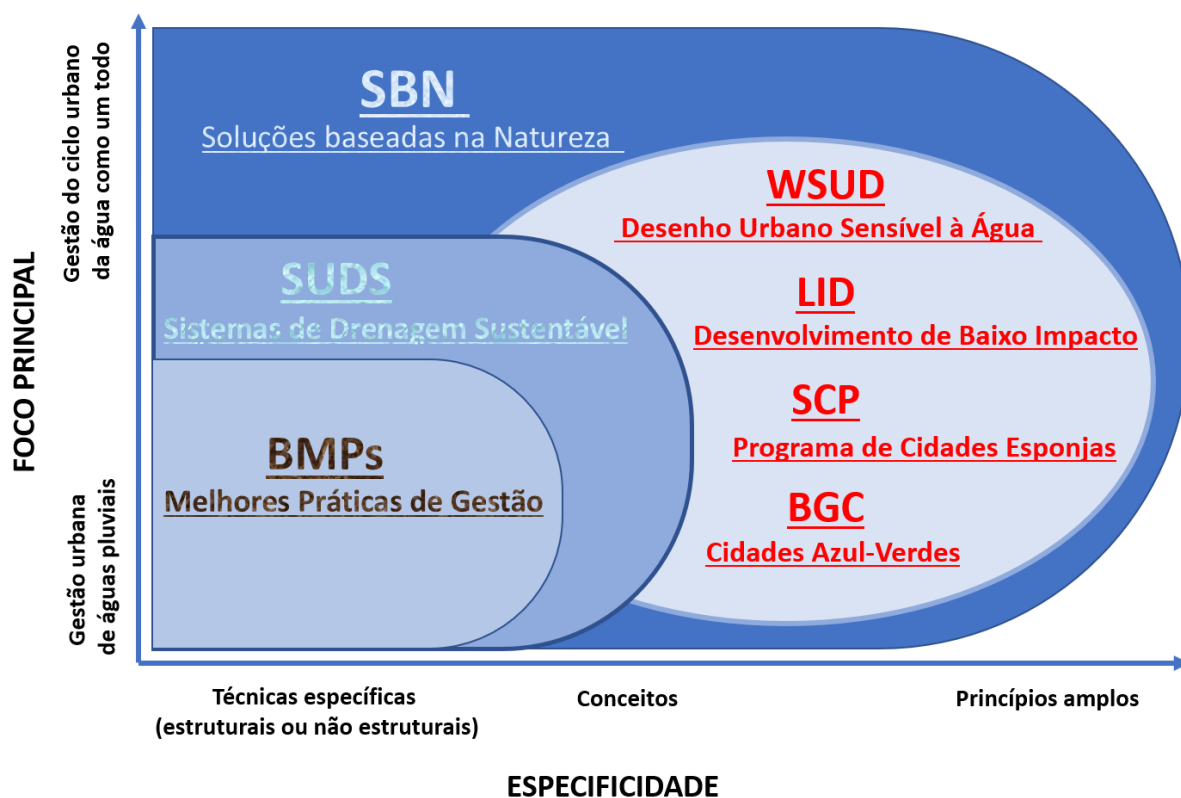
Nos anos 2000, a evolução dos conceitos culminou na ideia da Infraestrutura Verde, resultante da combinação das *BMPs* com os princípios do *LID*. Posteriormente, Singapura introduziu as medidas de Infraestrutura Verde-Azul, em 2010, o Reino Unido implementou as Cidades Verde-Azul, que buscam integrar a gestão do ciclo hidrológico urbano com espaços verdes e corredores públicos, promovendo um ciclo da água mais equilibrado no ambiente urbano (Qi et al., 2020; Chan et. al, 2018).

Ao longo dos anos, a evolução de diversos conceitos contribuiu para a construção de uma base de conhecimento voltada à gestão sustentável das águas e ao planejamento urbano, permitindo que a implementação dessas soluções e, conseqüentemente, das Cidades Esponja, atingisse os objetivos propostos. Esses conceitos estão alinhados aos princípios das *SbN*, sendo as Cidades Esponja fundamentadas em abordagens inspiradas na natureza.

As *SbN* englobam os conceitos apresentados anteriormente, conforme ilustrado na figura 23, que destaca o foco principal na gestão das águas pluviais urbanas. Essa abordagem inclui tanto a gestão do ciclo das águas pluviais em ambientes urbanos com o uso de tecnologias específicas estruturais e não estruturais, quanto conceitos e princípios mais amplos. De modo geral, esses conceitos visam estabelecer diretrizes e implementar soluções, como das Cidades Esponja. Elas restauram as condições ambientais e sistemas ecossistêmicos urbanos, além de reduzir riscos de inundações e alagamentos, mitigar os efeitos das mudanças climáticas extremas, melhorar a qualidade da água. Com isso, conseqüentemente, elevar a qualidade de

vida da população local. A figura 22 apresenta a relação dos conceitos conectados as SbN.

Figura 23 - Relação conceitos com a gestão das águas pluviais urbanas



Fonte: Adaptado de Qi et al., 2020.

Os conceitos de SbN são essenciais para orientar o desenvolvimento de soluções em uma Cidade Esponja. Por meio de medidas inspiradas na natureza ou na observação de fenômenos naturais que possam servir de referência para decisões relacionadas aos impactos de eventos climáticos extremos. No próximo tópico, será explorada a gestão sustentável da água urbana em uma Cidade Esponja.

2.3.1 Gestão Sustentável da água nas Cidades Esponja

As inundações se tornaram um grande desafio para as cidades chinesas. Com isso desde 2013, o governo chinês vem promovendo a aplicação do conceito de Cidades Esponja com a implementação do programa em mais de 70 cidades no país. Este tem o objetivo de criar um sistema que diminua o escoamento superficial da água fazendo que ela seja retida, armazenada e absorvida no solo por meio de mecanismos que permitam a permeabilidade da água através de solos drenantes e

vegetação.

O conceito de Cidades Esponja apresenta semelhanças com abordagens como o *LID*, desenvolvido nos Estados Unidos e Nova Zelândia; o *SuDS*, que abrange infraestruturas Azul-Verdes no Reino Unido; o *WSUD* na Austrália; e o Projeto Urbano de Desenvolvimento de Baixo Impacto (*LIDUD*) na Nova Zelândia. O objetivo das Cidades Esponja é aplicar e aprimorar os princípios do *LID*, favorecendo o controle do pico de vazão do escoamento urbano, além de purificar, armazenar e reutilizar águas pluviais. Isso inclui a modernização dos sistemas tradicionais de drenagem urbana por meio de infraestruturas verdes capazes de mitigar e resistir a eventos de inundações (Qi et al, 2020; Chan et. al, 2018).

Ademais, busca-se reduzir o excesso de águas pluviais, integrar corpos d'água naturais, como pântanos e lagos, promover objetivos multifuncionais nos projetos de drenagem, resultando em melhorias nos serviços ecossistêmicos. Essas práticas também incentivam a criação de extensas áreas alagáveis, com corpos d'água artificiais e espaços verdes (Chan et al., 2018).

Com base nas SbN, o conceito das cidades esponja garante que nas áreas urbanas haja uma transformação criando mais espaços para a absorção da água da chuva de forma natural, imitando a natureza e reproduzindo o que ocorre nas florestas. Além disso, estudos afirmam que o sistema apresenta um alto desempenho podendo atingir até 70% de absorção da água da chuva (Chan et. al, 2018). Nas cidades é desenvolvido um sistema que garante que fluxo natural da água pluvial para o solo através de áreas permeáveis e úmidas que cria uma espécie de esponja com o intuito de reter a água nos lençóis freáticos (figura 24).

Figura 24 - Modelo conceitual de uma cidade esponja com os mecanismos para a absorção da água da chuva



Fonte: Chan et. al, 2018.

A infraestrutura *LID* é projetada para melhorar o escoamento natural da água pluvial imitando uma resposta hidrológica capaz de reduzir os picos de vazão no sistema de drenagem urbana (Chan et. al, 2018). Nesse contexto, torna-se imprescindível o uso de ferramentas técnicas que possibilitem a análise espacial detalhada das áreas urbanas, permitindo identificar vulnerabilidades, projetar intervenções e simular cenários futuros. Assim, o próximo capítulo apresenta o geoprocessamento como instrumento essencial para aplicar esses conceitos, com foco na bacia do Ribeirão Arrudas.

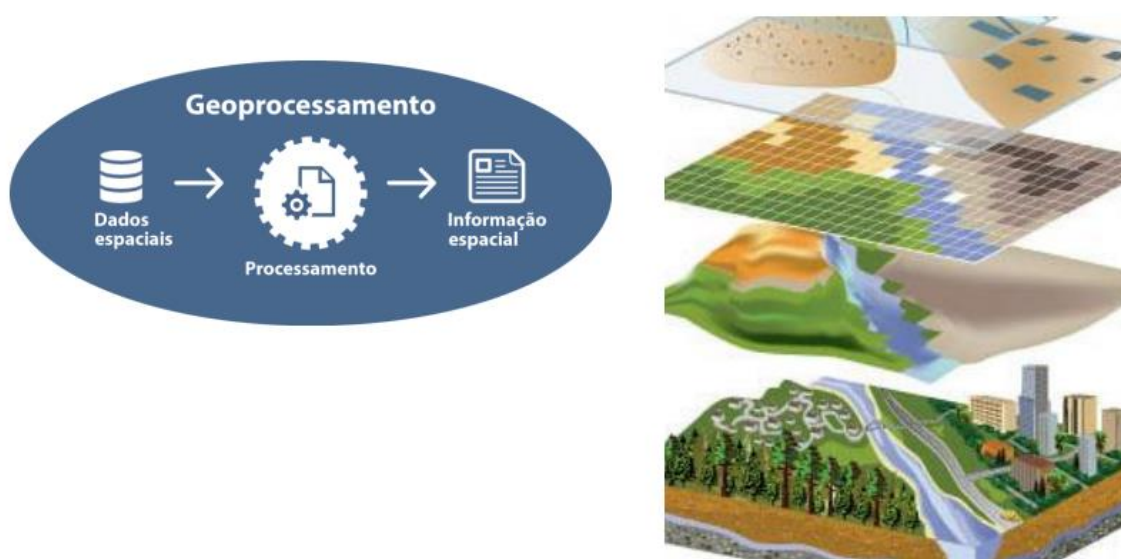
2.4 GEOPROCESSAMENTO (GEOTECNOLOGIA)

A utilização do geoprocessamento tem se mostrado cada vez mais relevante para a gestão e o planejamento urbano. Segundo Moura (2010), trata-se de uma ferramenta essencial para o tratamento de dados geográficos, permitindo a automatização da produção de documentos cartográficos e o cruzamento de informações espaciais. Essa tecnologia torna possível compreender o território a partir de sua localização geográfica, favorecendo análises mais precisas sobre a dinâmica urbana e ambiental.

No planejamento urbano, o geoprocessamento se destaca por permitir a construção de modelos representativos do território, colaborando na formulação de estratégias mais eficazes de intervenção. Conforme Santana (2014), a leitura visual do território é sempre um recorte da realidade, marcado por temporalidades, contextos culturais e interpretações individuais. Assim, os mapas produzidos com auxílio de geotecnologias não apenas informam, mas interpretam e orientam as tomadas de decisão, especialmente em contextos de riscos ambientais, como alagamentos e inundações.

Na figura 25 tem-se um esquema que será utilizado no trabalho por meio de geoprocessamento para a elaboração de mapas com as manchas urbanas (*patches*) para análise espacial da paisagem urbana.

Figura 25 – Esquema do Geoprocessamento



Fonte: Geolnova, 2023; bichodomatoip.org.

No desenvolvimento deste trabalho, o geoprocessamento será empregado como base para a produção e interpretação de dados espaciais, oferecendo suporte técnico para a análise do território ao longo do Ribeirão Arrudas, em Belo Horizonte. As informações levantadas são o suporte para a elaboração de mapas temáticos que representarão, por exemplo, manchas urbanas (*patches*) (Forman e Godron, 1986), áreas de risco de inundação, uso e ocupação do solo, além de índices de impermeabilização. Esses dados serão fundamentais para a identificação de

padrões urbanos e ambientais e para a proposição de soluções baseadas na natureza.

O capítulo sobre geoprocessamento abordará detalhadamente as etapas metodológicas adotadas na manipulação dos dados espaciais, incluindo a utilização de *softwares* para análises hidrodinâmicas. Serão discutidas as fontes de dados, os critérios de seleção das camadas de informação e os métodos de elaboração dos mapas, além da integração desses resultados com o conceito de cidades esponja. Dessa forma, o geoprocessamento será articulado como uma ferramenta estratégica para compreender a paisagem urbana e propor intervenções sustentáveis que dialoguem com a realidade da bacia do Ribeirão Arrudas.

2.4.1 Sistema de Informações Geográfica (SIG)

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) segundo Câmara e Davis (2001) apresenta-se como um conjunto de ferramentas computacionais integrada ao Geoprocessamento. Com isso, pode ser criado um banco de dados digital com informações georreferenciadas que permite trabalhar, manipular e integrar dados de diferentes fontes. Segundo Fitz (2008), os SIGs correspondem as ferramentas computacionais desenvolvidas para coletar, armazenar, processar e analisar dados georreferenciados, possibilitando a produção de informação espacial.

O termo SIG foi empregado pela primeira vez em 1962, no Canadá, por meio do *Canadian Geographic Information System* (CGIS). Esse sistema pioneiro tinha como objetivo processar e analisar grandes volumes de dados geográficos, especialmente no âmbito de um inventário nacional de terras, integrando aspectos socioeconômicos e ambientais (Avelino, 2004). Com o avanço da tecnologia digital e a redução dos custos operacionais, tornou-se possível resolver de maneira mais eficiente os desafios relacionados ao tratamento desse grande volume de informações, permitindo, por exemplo, a sobreposição de mapas temáticos e a medição de áreas, que até então, eram extremamente complexas quando realizadas manualmente (Teixeira, 1993).

Os SIGs têm sido definidos de diferentes maneiras ao longo do tempo, refletindo a evolução de seu uso e suas potencialidades. Burrough (1986) os descreve como um

conjunto de ferramentas que tem o objetivo de garantir a coleta, o armazenamento, recuperação, transformação e visualização de informações sobre o mundo real. Segundo Aronoff (1989), trata-se de um conjunto de procedimentos, manuais ou computacionais, voltados ao armazenamento e manipulação de dados georreferenciados.

Na visão de Cowen (1988), o SIG atua como um suporte à decisão, integrando dados espacialmente referenciados em um ambiente de respostas a problemas concretos. Beltrame (1994), por sua vez, enfatiza a função dos programas de computador em integrar diferentes dados temáticos de uma mesma área de estudo, com o propósito de aprimorar processos decisórios de natureza espacial, sempre de forma atualizada e confiável.

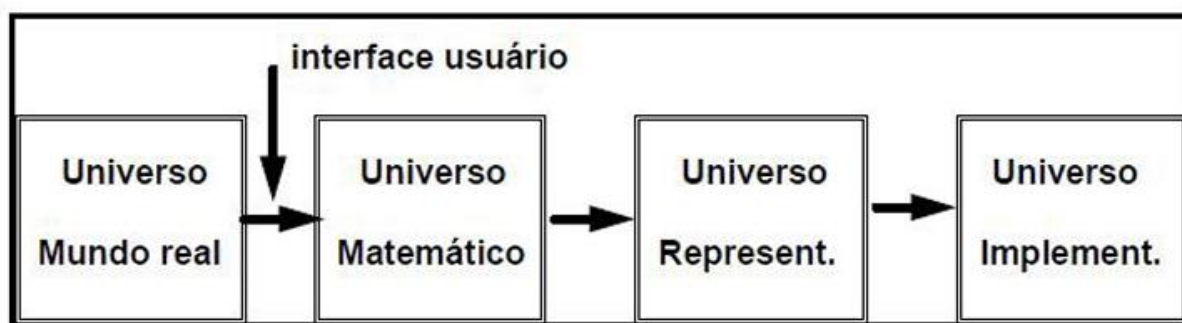
Os SIGs se apresentam sob a forma de dois tipos de modelos, o matricial e o vetorial, sendo que ambos são utilizados para a representação gráfica do mundo real para o ambiente digital. O modelo vetorial é representado pela geometria do terreno que formam um *shapefile* que pode armazenar a localização e os atributos de características geográficas. O modelo matricial, denominado *raster*, o espaço terrestre é representado por uma matriz composta por linhas e colunas. Cada célula dessa matriz, chamada *pixel*, armazena um valor associado a um determinado atributo, como a altitude do terreno ou variações de tons de cinza, permitindo a representação espacial de diferentes características da superfície (Ferreira, 2006).

As ferramentas de um SIG são estruturadas a partir de modelos que buscam representar o mundo real. Nesse sentido, Câmara e Monteiro (2001) destacam a existência de quatro universos fundamentais para essa representação. O primeiro é o universo do mundo real, que abrange os fenômenos observados, como uso e ocupação do solo, rede hidrográfica, aspectos geológicos, dados sociais e cadastro urbano. Em seguida, o universo matemático organiza essas informações em classes específicas, distinguindo, por exemplo, dados contínuos e dados individualizados, o que permite a formalização dos diferentes tipos de dados geográficos.

No universo de representação, essas classes são transformadas em modelos geométricos, como o matricial e o vetorial, cuja escolha depende da escala de trabalho e da projeção cartográfica adotada. Por fim, no universo de implementação, os modelos de dados são concretizados por meio de linguagens computacionais,

possibilitando o processamento e a análise dentro dos *softwares* de SIG (Câmara e Monteiro, 2001). Na figura 26 apresenta-se o esquema gráfico dos distintos universos utilizados na representação do SIG.

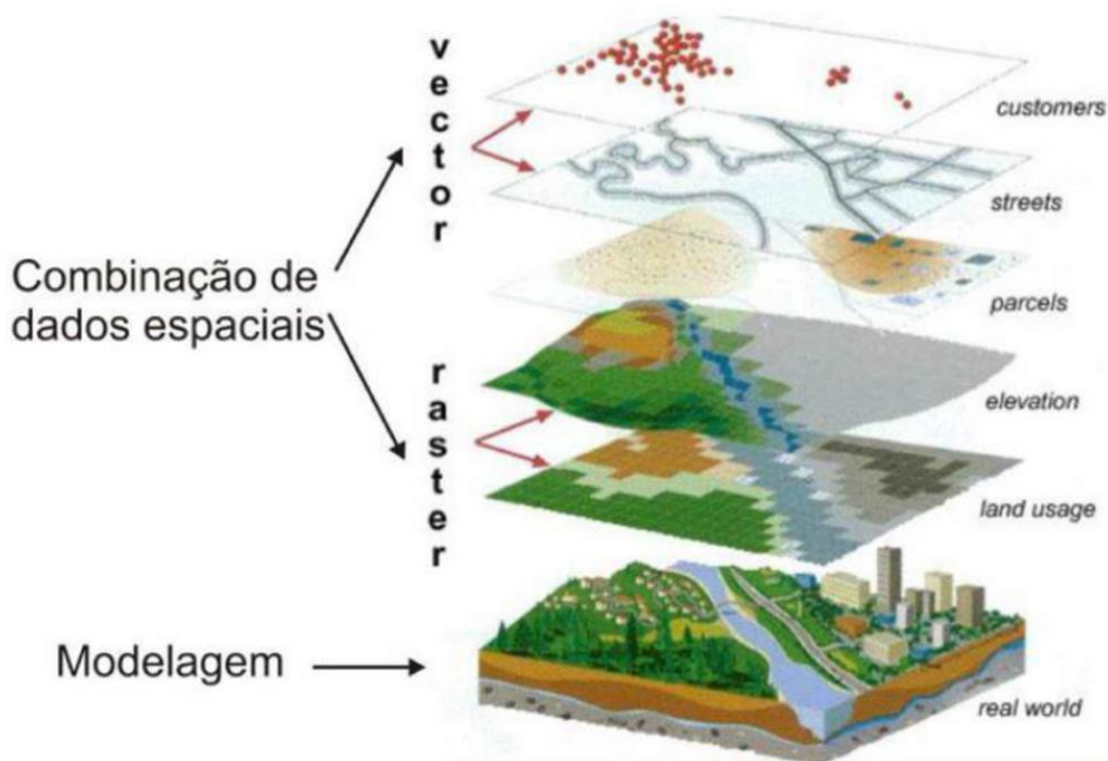
Figura 26 - Os quatro universos



Fonte: Câmara e Monteiro, 2001.

No modelo vetorial é constituído por vértices definidos pelas coordenadas X e Y e pode ser representado por três elementos gráficos principais: ponto, linha e polígono (Câmara e Monteiro, 2001; Ferreira, 2006). Quando há apenas um par de coordenadas, o vetor é classificado como ponto, e quando existem dois ou mais pares de coordenadas, em que o primeiro e o último vértices não coincidam, trata-se de uma linha. Quando há quatro ou mais vértices e o primeiro coincide com o último, o vetor corresponde a um polígono (Bossler, 2016; Ferreira, 2006). Na figura 27 apresenta-se os ambos modelos de representação na combinação dos dados espaciais.

Figura 27 - Combinação de dados espaciais com modelo matricial (*raster*) e vetorial



Fonte: Geolnova, 2023; bichodomatoip.org.

O SIG consolida-se como ferramenta essencial para o tratamento e interpretação de informações espaciais, com aplicabilidade em diferentes áreas. É aplicável no mapeamento do uso do solo, no planejamento urbano, no estudo e a organização de sistemas de transporte, na análise geodemográfica para localização de serviços, além do monitoramento de redes de infraestrutura como as redes de água.

A Geografia, diante da necessidade de compreender de forma mais precisa as dinâmicas territoriais, encontra no SIG um recurso fundamental para mapear, acompanhar e interpretar o espaço geográfico. Mais do que uma atualização tecnológica, essa ferramenta representa uma resposta prática e científica, acumulando cerca de duas décadas de uso contínuo e consolidado pela comunidade acadêmica nacional e internacional, o que tem possibilitado avanços significativos na análise e na gestão espacial (Avelino, 2004).

O geoprocessamento, sustentado pelas ferramentas consolida-se como um recurso essencial para integrar, analisar e representar dados espaciais de forma aplicada ao planejamento urbano e ambiental. Sua capacidade de transformar informações

complexas em representações cartográficas e modelos digitais permite compreender dinâmicas territoriais e propor soluções mais eficazes para problemas urbanos (Câmara e Monteiro, 2001; Fitz, 2008; Avelino, 2004). A aplicação desses sistemas, portanto, não se limita ao mapeamento, mas articula ciência, tecnologia e gestão espacial, fornecendo subsídios para a tomada de decisão em contextos de alta vulnerabilidade socioambiental. Nesse sentido, torna-se fundamental associar o uso do SIG ao sensoriamento remoto, que fornece os dados de base indispensáveis para ampliar a precisão e a escala das análises.

O conceito contemporâneo de Sistema de Informação Geográfica (SIG) ultrapassa a ideia de um simples banco de dados espacial, incorporando a modelagem avançada de dados georreferenciados e sua integração com o BIM (Building Information Modeling). Essa abordagem amplia a análise para incluir não apenas informações bidimensionais, mas também elementos tridimensionais e suas relações topológicas, permitindo uma compreensão mais robusta e sistêmica do espaço construído. Nesse contexto, a convergência entre SIG e BIM tem se consolidado como uma estratégia fundamental para o planejamento e a gestão territorial, especialmente em estudos que demandam maior precisão analítica e capacidade preditiva.

Diversos estudos recentes evidenciam os avanços dessa integração. Allalou et al. (2026) aplicaram a modelagem hidrodinâmica integrada ao BIM-GIS para avaliar riscos de inundação em rodovias em Wadi Chiffa, na Argélia, demonstrando que essa abordagem supera modelos hidrodinâmicos convencionais em termos de capacidade preditiva. Cao et al. (2026), por sua vez, investigaram a modelagem paramétrica de estradas aliada à integração BIM-GIS, comparando métodos como a modelagem fotográfica oblíqua (OPM) e o método de elementos diferenciais (DiEM), sendo este último mais eficiente em termos de precisão, produtividade e organização de dados. Já Rani e Yadav (2026) discutem o papel dessa integração no planejamento urbano sustentável, destacando avanços na modelagem tridimensional, na interoperabilidade de dados e em aplicações práticas voltadas à infraestrutura verde, avaliação de impactos ambientais e uso sustentável do solo.

2.4.2 Sensoriamento Remoto

Segundo Florenzano (2007) o Sensoriamento Remoto é a obtenção de imagens ou demais dados da superfície terrestre por uma tecnologia que utiliza a captação e registro da energia refletida ou emitida da superfície. Sensores em plataformas aéreas, terrestres e orbitais por meio de satélites artificiais permitem coletar os dados georreferenciados necessários. O termo remoto refere-se a coleta de dados que é realizada à distância, sem contato físico entre o sensor e os objetos localizados na superfície terrestre (Florenzano, 2007).

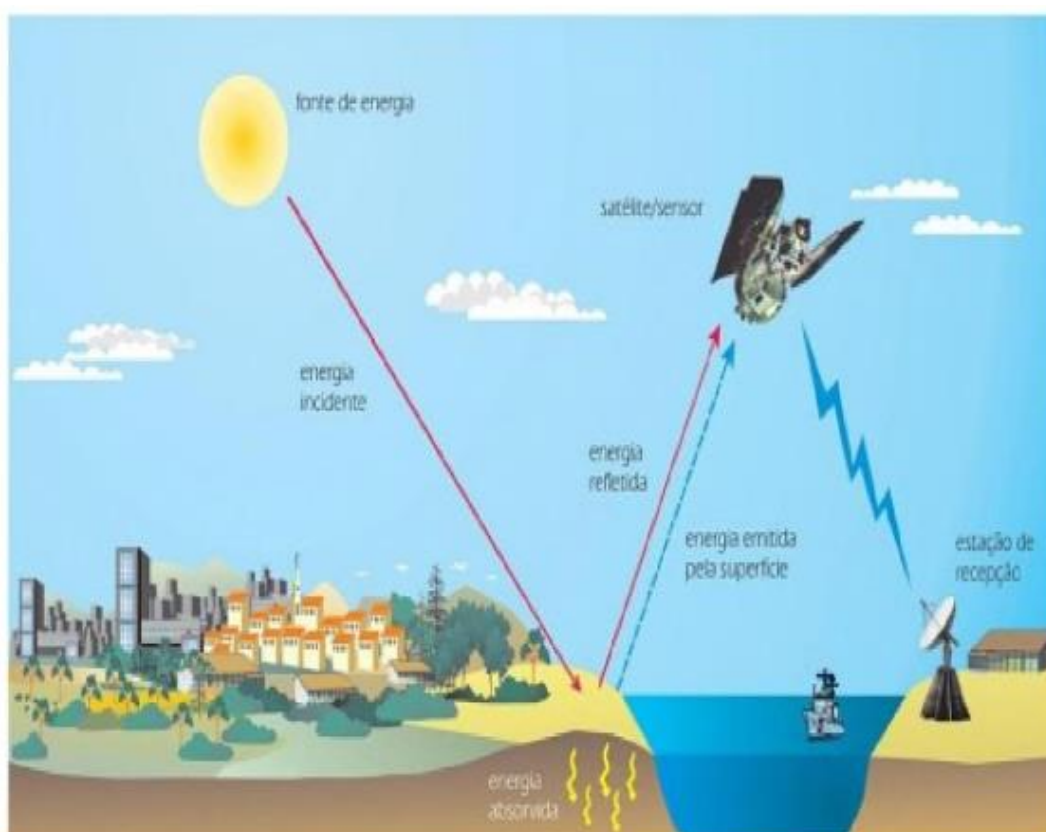
O sensoriamento remoto tem sua origem vinculada à fotografia aérea, inicialmente utilizada em 1856 a partir de registros feitos por balões e, posteriormente, intensificada durante os conflitos militares, como a Guerra Civil Americana e as duas Guerras Mundiais. Nesse período, foram desenvolvidas tecnologias como o filme infravermelho e o radar, voltadas ao reconhecimento e à detecção de alvos (Florenzano, 2007).

A partir da década de 1960, com a corrida espacial, surgiram as primeiras imagens orbitais captadas por satélites, como os programas *Mercury*, *Gemini* e *Apollo*, que demonstraram o potencial dessa tecnologia e estimularam a criação de satélites específicos para o monitoramento meteorológico e de recursos naturais. O lançamento do *Landsat-1*, em 1972, consolidou o uso científico das imagens de satélite, que passaram a apoiar estudos ambientais, urbanos e agrícolas (Florenzano, 2007).

No Brasil, as primeiras imagens do *Landsat* foram recebidas em 1973, e em 2025 o país participa de programas internacionais, como o Programa Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS) (*China-Brazil Earth Resources Satellite*) INPE (2024). O próximo satélite, o CBERS-6, está previsto para ser lançado em 2028 com tecnologia avançada de Radar de Abertura Sintética (SAR) em parceria com a China, com o monitoramento da superfície terrestre e o fortalecimento do sensoriamento remoto no país (INPE, 2024; MCTI, 2025). Segundo o INPE (2024), “o Programa CBERS nasceu de uma parceria bilateral entre o Brasil e a China, visando o desenvolvimento e operação conjunta de satélites de sensoriamento remoto”.

Na figura 28 tem-se a explicação do processo do sensoriamento remoto atualizando como fonte primária a energia solar. Parte da radiação incidente é absorvida pela superfície terrestre e parte é refletida ou emitida, sendo captada por sensores a bordo de satélites. Esses dados são transmitidos a uma estação de recepção, permitindo o monitoramento e análise de diferentes características da superfície, como cobertura do solo, corpos d'água e áreas urbanas.

Figura 28 - Captura de imagens por sensoriamento remoto



Fonte - Florenzano, 2007.

O sensoriamento remoto, ao fornecer imagens e dados espectrais da superfície terrestre, amplia significativamente as possibilidades de análise espacial no geoprocessamento. Desta forma, pode-se permitir identificar padrões, monitorar mudanças e subsidiar o planejamento urbano e ambiental. Integrado a ferramentas do SIG, possibilita a geração de informações detalhadas sobre uso e cobertura do solo, recursos hídricos e áreas de risco, fortalecendo a tomada de decisão em contextos complexos (Câmara e Monteiro, 2001; Florenzano, 2007). Essa integração constitui a base para análises mais precisas, que se aprofundam com a aplicação de modelos digitais de elevação, tema do próximo tópico.

2.4.3 Modelo Digital de Elevação – MDE

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é uma representação digital da superfície terrestre que descreve as altitudes do relevo em relação ao nível do mar, permitindo a análise detalhada das variações topográficas. O MDE corresponde à representação da superfície do relevo por meio de uma grade de células georreferenciadas (Campos, 2022). Diferente de uma simples representação plana, o MDE agrega informações sobre as feições do terreno e pode incluir elementos como edificações e cobertura vegetal, dependendo do tipo de dado utilizado (Santos, 2018).

Os MDEs tornaram-se fundamentais em diversas áreas, como geomorfologia, hidrologia, climatologia, agricultura e cartografia, sendo aplicados em análises que exigem precisão espacial. No entanto, erros verticais podem comprometer os resultados, tornando essencial avaliar a qualidade do modelo em função de sua aplicação (Wechsler, 2007; Rao et al., 2014; Lacerda et al., 2021, Cremon et al., 2022, Nero et al, 2024). Com o avanço das tecnologias, surgiram diferentes MDEs gratuitos de cobertura quase global, cuja acurácia pode variar conforme a região (Han et al., 2021; Cremon et al., 2022).

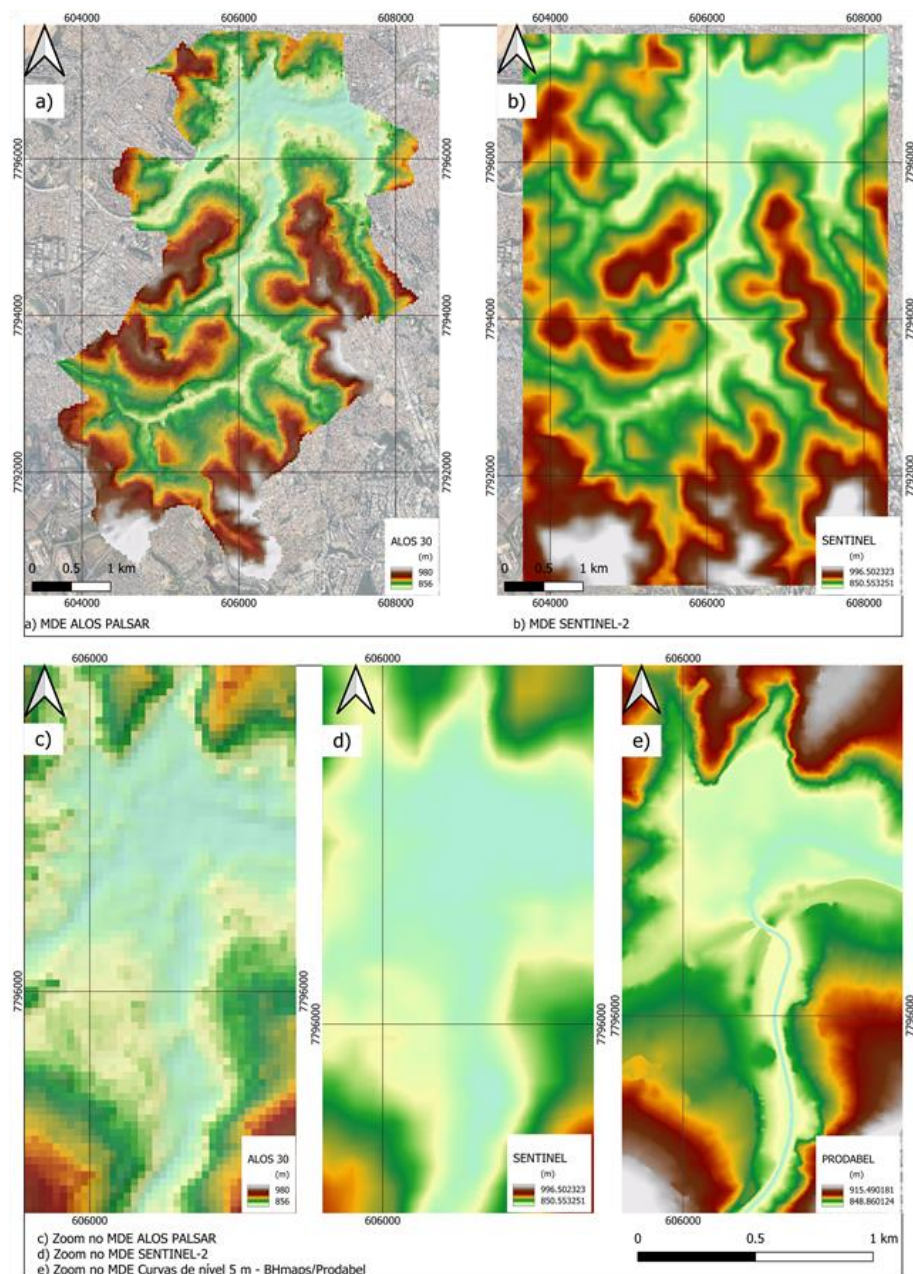
Entre eles, destaca-se o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), obtido em 2000, considerado um marco por disponibilizar dados globais amplamente utilizados, apesar de limitações em áreas de sombra e altas latitudes (Rodrigues et al., 2011; França et al., 2018; Orlandi et al., 2019; Cremon et al., 2022). Posteriormente, outros produtos como *ASTER GDEM*, *AW3D30* e *NASADEM* ampliaram as possibilidades de uso, reforçando a evolução e a relevância dos MDEs em estudos ambientais e urbanos (Cremon et al., 2022).

Essa ferramenta tem ampla aplicação em estudos ambientais, urbanos e de recursos hídricos, pois possibilita a simulação de cenários de escoamento superficial, a modelagem hidrológica e o planejamento territorial. De acordo com Florenzano (2007), os modelos digitais se tornaram indispensáveis no campo do sensoriamento remoto e do geoprocessamento, uma vez que auxiliam na integração de dados espaciais e na geração de mapas temáticos de alta precisão. Dessa forma, o MDE constitui um recurso essencial para a análise da paisagem urbana e para a

formulação de estratégias de gestão sustentável da água, em especial em áreas suscetíveis a inundações.

Na figura 29, para a geração dos MDEs *Alos Palsar* e *Sentinel-2* foi utilizado o sistema de referência global WGS 84, compatível com o SIRGAS2000, que substituiu o antigo Sistema Geodésico de Referência no Brasil (Monico, 2000; Elmiro et al., 2016). A comparação entre os modelos evidencia diferenças significativas de resolução e detalhamento: o *Alos Palsar* (30 m) apresenta relevo mais generalizado e pixelizado, o *Sentinel-2* (10 m) oferece um detalhamento intermediário com transições mais suaves, enquanto as curvas de nível da Prodabel (5 m) garantem maior precisão na representação topográfica.

Figura 29 - Modelo digital de elevação: a) *Alos Palsar*; b) *Sentinel-2*; c) Zoom de uma área utilizando o *Alos Palsar*; d) Zoom de uma área utilizando o *Sentinel-2*; e) Zoom de uma área utilizando as curvas de nível de 5m *BHmaps*



Fonte: Autora, 2026.

Para que a modelagem hidráulica apresente resultados confiáveis, é fundamental que o MDE possua alta resolução, assegurando maior precisão nas simulações realizadas. Conforme destaca a Base Aerofoto (2023), eles possuem ampla aplicação em áreas como engenharia, planejamento urbano, monitoramento ambiental e geoprocessamento, possibilitando análises detalhadas da superfície terrestre e subsidiando tomadas de decisão mais seguras.

Com isso, a integração entre os modelos digitais e ferramentas de geoprocessamento torna-se essencial para representar adequadamente a dinâmica do relevo e apoiar intervenções em contextos urbanos e ambientais. Para que a modelagem hidráulica apresente resultados confiáveis, é fundamental que esse MDE possua alta resolução, garantindo maior precisão nas simulações realizadas (Campos, 2022). A partir dessa base, é possível avançar para a compreensão do Modelo Digital do Terreno (MDT), que refina a análise ao representar exclusivamente a superfície do solo, sem considerar elementos sobrepostos como vegetação e edificações.

2.4.4 Modelo Digital de Terreno – MDT

O Modelo Digital do Terreno (MDT) corresponde a uma representação tridimensional da superfície terrestre, na qual são considerados apenas os elementos do relevo, desconsiderando vegetação, edificações e demais estruturas artificiais (Felgueiras, 1999). Diferente do MDE, que integra todos os elementos presentes sobre a superfície, o MDT busca representar o solo nu com maior precisão, sendo amplamente utilizado em análises geológicas, geomorfológicas e hidrológicas (IBGE, 2018). Essa distinção torna o MDT uma ferramenta indispensável em estudos que exigem a compreensão detalhada da morfologia do terreno, servindo como base para simulações hidráulicas e planejamento urbano em áreas sujeitas a riscos naturais.

Este modelo MDT surgiu a partir da evolução das técnicas cartográficas e topográficas, que buscavam representar a superfície terrestre com maior precisão para fins de planejamento e análise espacial. Seu desenvolvimento foi impulsionado na década de 1950, com os primeiros registros de representação digital do relevo em três dimensões a partir de curvas de nível e pontos amostrais (Burrough & McDonnell, 1998). Posteriormente, o avanço das geotecnologias e do sensoriamento remoto ampliou o acesso a dados altimétricos mais detalhados, permitindo a construção de modelos cada vez mais realistas da superfície terrestre (Florenzano, 2007; Hung et al., 2018). No Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) consolidou a definição e aplicação do MDT em seus manuais técnicos, destacando sua importância para análises territoriais e ambientais (IBGE, 2018). O

MDT é considerado um instrumento essencial para estudos que exigem a compreensão detalhada do relevo, como a gestão de riscos naturais e o desenvolvimento de infraestruturas urbanas.

A figura 30 ilustra de forma clara a diferença entre o Modelo Digital de Superfície (MDS) e o Modelo Digital do Terreno (MDT).

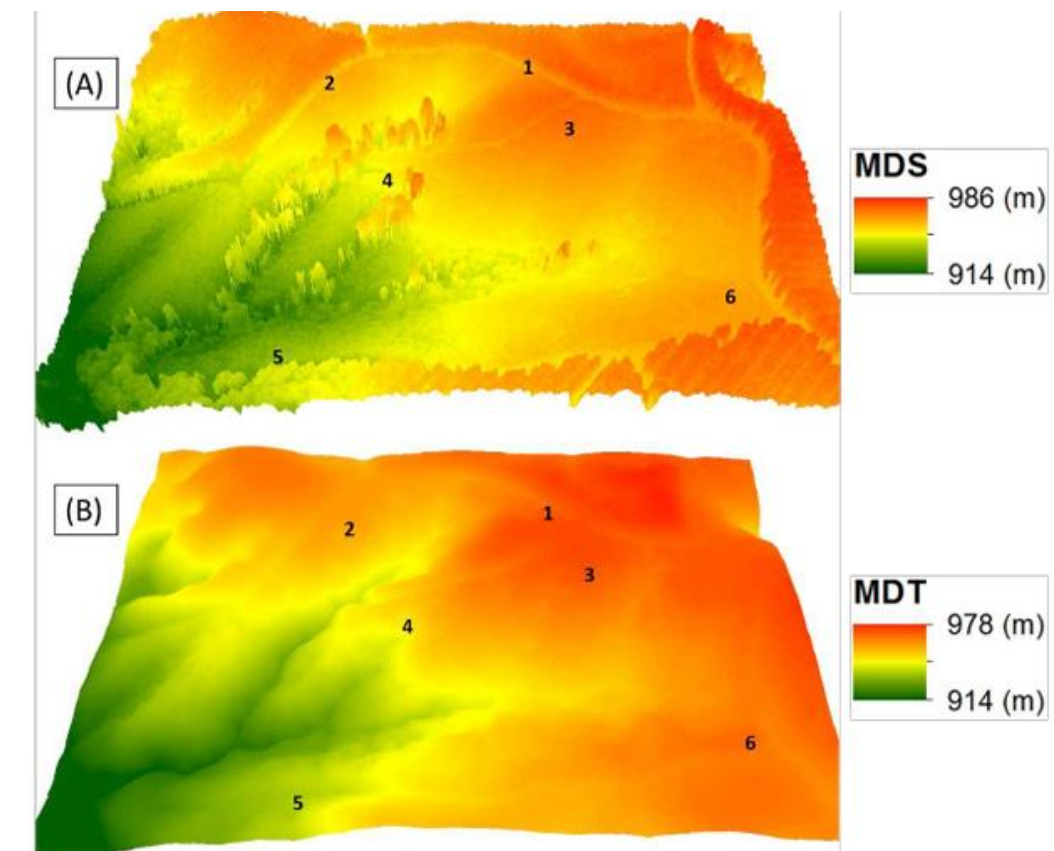
O MDS (A) considera todos os elementos que compõem a superfície terrestre, como vegetação e edificações, resultando em um modelo mais rugoso e detalhado.

O MDT (B) representa apenas o relevo nu, desconsiderando elementos superficiais, oferecendo uma visão mais precisa da topografia do solo.

Essa distinção é fundamental em análises hidrológicas e geomorfológicas, pois a avaliação da acurácia do MDT garante maior confiabilidade nos resultados de simulações hidráulicas e hidrodinâmicas, evitando distorções causadas por feições artificiais ou temporárias da paisagem (Felgueiras, 1999). Assim, um MDT de qualidade é indispensável para estudos que buscam compreender o comportamento do escoamento superficial e planejar intervenções em áreas urbanas suscetíveis a inundações.

A figura 30 apresenta um experimento comparativo entre o MDS e MDT na Bacia experimental do rio Saci localizada no município de Rio Negrinho –SC, e que possui uma área de 0,18km², operada pelo Laboratório de Hidrogeomorfologia (LHG – UFPR) segundo Hung et al. (2018).

Figura 30 - MDS (A) e MDT (B) da bacia experimental do rio Saci, Rio Negrinho–SC



Fonte: Hung et al., 2018.

De modo geral, MDT tem aplicação fundamental em estudos urbanos e ambientais por permitir uma representação fiel do relevo, excluindo interferências de vegetação e construções. Em Belo Horizonte, cidade caracterizada por relevo acidentado e pela presença de diversos cursos d'água canalizados, o uso do MDT possibilita identificar áreas suscetíveis a inundações e processos erosivos, além de apoiar o planejamento urbano em regiões de risco. Sua integração ao geoprocessamento fornece subsídios para análises mais detalhadas da drenagem urbana e para a proposição de SbN, como parques alagáveis e jardins de chuva, tornando-se uma ferramenta estratégica para a gestão territorial e para a resiliência climática da capital mineira. Nesse sentido, a utilização do MDT disponibilizado pela Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte (Prodabel) é fundamental para às modelagens espaciais com o *software* HEC-RAS, que permite simular o comportamento hidrodinâmico das águas.

2.4.5 Modelagens Espaciais – *HEC-RAS*

A modelagem espacial é uma técnica fundamental da geotecnologia, onde utiliza-se dados geográficos distribuídos no espaço para simular, analisar e prever fenômenos naturais ou urbanos. Como exemplo, incluem-se análises preditivas do escoamento de águas pluviais, da erosão, do uso do solo e da cobertura vegetal. Ela permite incorporar variabilidades espaciais topográficas, pluviométricas, de solo, entre outras que impactam diretamente no comportamento hidrológico de bacias (Terink et al., 2015; Huang et al., 2019). A modelagem espacial se torna ferramenta fundamental no geoprocessamento para apoiar diagnósticos, simulações e o planejamento de soluções para problemas como inundações ou gestão de águas urbanas.

É um dispositivo que permite representar e analisar fenômenos geográficos por meio de modelos computacionais. Sua aplicação em SIG possibilita simular e prever variáveis como a dinâmica territorial, o planejamento urbano, a gestão ambiental e os riscos naturais, apoiando decisões mais eficientes e sustentáveis. Ao integrar dados geográficos com algoritmos matemáticos, ela favorece a interpretação de informações complexas e a identificação de padrões e tendências (Li, 2019).

A modelagem espacial dinâmica busca representar matematicamente processos do mundo real, descrevendo as variações de forças direcionais que interagem sobre a superfície terrestre. Essa abordagem envolve a construção de abstrações e sequências lógicas apoiadas em hipóteses e prognósticos, que permitem compreender as relações entre os elementos espaciais e verificar os processos dinâmicos que moldam o ambiente (Kawashima et al., 2016; Bledow, 2023).

Segundo Burrough & McDonnell (1998), um modelo espacial é considerado dinâmico quando a localização de um fenômeno se altera em resposta a essas forças, superando a limitação estática dos modelos tradicionais. Nesse sentido, no caso da simulação de uso e cobertura da terra, os modelos dinâmicos espaciais possibilitam projetar paisagens futuras a partir da análise de padrões históricos, exigindo a definição de uma configuração inicial e de funções de mudança que descrevam as regras de transição resultando em cenários futuros representados por mapas de simulação (Soares-Filho et al., 2007; Bledow, 2023).

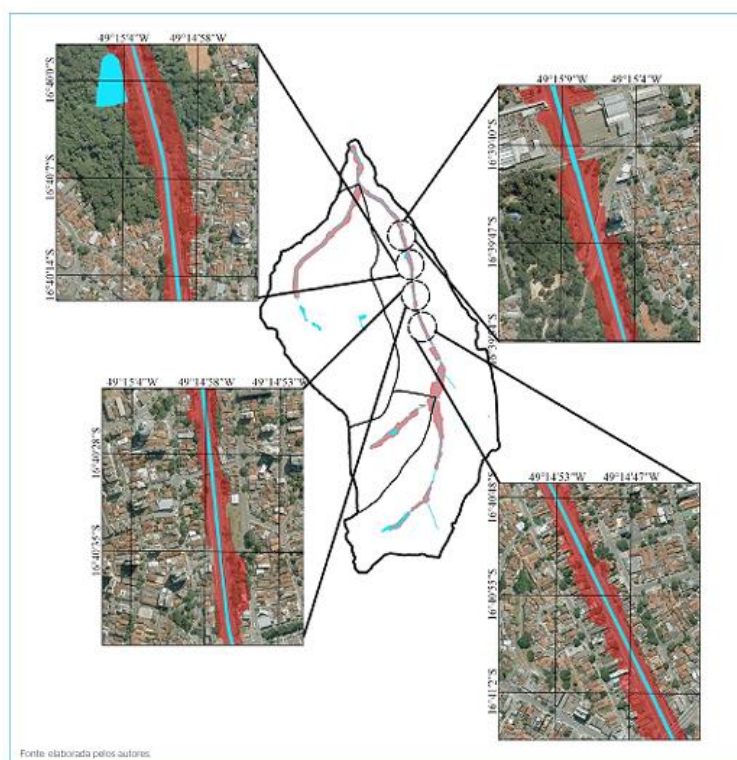
A modelagem hidrológica e hidrodinâmica de bacias hidrográficas constitui um campo fundamental para compreender o comportamento das águas superficiais e subsidiar o planejamento da gestão hídrica. Esse processo envolve o acoplamento entre modelos hidrológico-hidráulicos e hidrodinâmicos, permitindo simular a variação de vazões, identificar áreas suscetíveis a inundações e analisar a dinâmica dos corpos d'água em diferentes cenários (Lopes, 2017).

Entre as ferramentas disponíveis, destaca-se o *HEC-RAS - Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (US Army Corps of Engineers, 2025)*, software desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. Essa aplicação é amplamente utilizada para modelagem hidrológica, possibilitando cálculos de escoamento permanente e transitório em uma ou duas dimensões, o que garante maior precisão nas simulações de enchentes e escoamento superficial (Campos, 2022).

Além de sua versatilidade na simulação de fluxos, o *HEC-RAS (US Army Corps of Engineers, 2025)*, oferece recursos avançados para a análise de transporte de sedimentos, dinâmica de leito móvel e qualidade da água. Tais funcionalidades tornam o software uma ferramenta estratégica para estudos aplicados à gestão de recursos hídricos e ao desenvolvimento de soluções baseadas na natureza, como as Cidades Esponja, que buscam integrar infraestrutura verde e sistemas de drenagem sustentável para mitigar os impactos das mudanças climáticas em áreas urbanas (Campos, 2022; Lopes, 2017).

Nesse contexto, o uso de ferramentas específicas, como o *HEC-RAS (US Army Corps of Engineers, 2025)*, torna-se fundamental para a modelagem de escoamento e inundações, ampliando o potencial de análise e subsidiando estratégias de planejamento urbano e gestão de riscos. Na figura 31 tem-se resultado de uma simulação hidrodinâmica utilizando o software *HEC-RAS*.

Figura 31 - Resultado de simulação hidrodinâmica no *HEC-RAS*



Fonte: Mendes et al., 2022.

Os coeficientes de perda de energia no *HEC-RAS* representam a redução da velocidade da água ao escoar em canais. Essas perdas estão associadas ao atrito com o leito (Manning)¹, às mudanças na geometria do canal e à presença de estruturas. Valores maiores indicam maior dissipação de energia. Sua correta definição é essencial para simulações mais realistas de inundações (USACE, 2023).

A utilização do *HEC-RAS* (2025), para as modelagens espaciais demonstra sua relevância para integrar análises hidrológicas e hidrodinâmicas, no planejamento urbano e para a mitigação de riscos associados às inundações. A compreensão dessas potencialidades fornece a base necessária para a condução desta pesquisa, orientando a escolha dos métodos e técnicas empregados. O próximo capítulo apresenta os Procedimentos Metodológicos, detalhando as etapas adotadas para alcançar os objetivos propostos.

¹ O coeficiente de rugosidade de Manning é um parâmetro empírico amplamente utilizado na hidráulica para representar a resistência ao escoamento da água em canais naturais ou artificiais. Seu valor depende das características da superfície, como tipo de material, irregularidades, presença de vegetação e grau de impermeabilização (Chow, 1959; Tucci, 2009).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O emprego das geotecnologias será avaliado como ferramenta de apoio para a melhoria da drenagem urbana em Belo Horizonte. Para isso, serão utilizados softwares de SIG, com destaque para o QGIS (QGIS, 2023), o qual já era utilizado em versões anteriores, segundo IBGE (2018), associado a dados cartográficos e hidrológicos da área de estudo. Além disso, serão aplicadas simulações hidrodinâmicas² por meio do *HEC-RAS*, o qual foi desenvolvido para USACE (2016, 2023, 2024a, 2024b, 2024c, 2025), visando compreender o comportamento das inundações em diferentes cenários. A integração entre geoprocessamento e modelagem hidrodinâmica, baseado no que é apresentado em USACE (2025), permitirá analisar a vulnerabilidade da região estudada, especialmente no trecho da Avenida Teresa Cristina, e produzir mapas temáticos que evidenciem as áreas de maior risco.

Com base nos resultados obtidos, serão sugeridas soluções tecnológicas e diretrizes de planejamento que possam mitigar os problemas recorrentes de inundações em Belo Horizonte. Essas propostas incluirão medidas de infraestrutura verde, como jardins de chuva, parques alagáveis e pavimentos permeáveis, avaliadas quanto à sua viabilidade e capacidade de integração com o planejamento urbano. As simulações desenvolvidas fornecerão subsídios técnicos para a proposição dessas soluções, enquanto a discussão crítica com base no referencial teórico garantirá a consistência das recomendações apresentadas.

A figura 32 apresenta o esquema que orienta o desenvolvimento desta pesquisa, estruturado a partir de conceitos-chave como cidades esponja, geoprocessamento, planejamento urbano, drenagem urbana, paisagem urbana e a análise da geomorfologia fluvial do Ribeirão Arrudas. Esta área foi selecionada para o estudo de caso. Esses fundamentos teóricos sustentam uma abordagem integrada voltada à gestão sustentável da água pluvial em contextos urbanos.

O fluxograma representa a metodologia adotada, composta por etapas como revisão

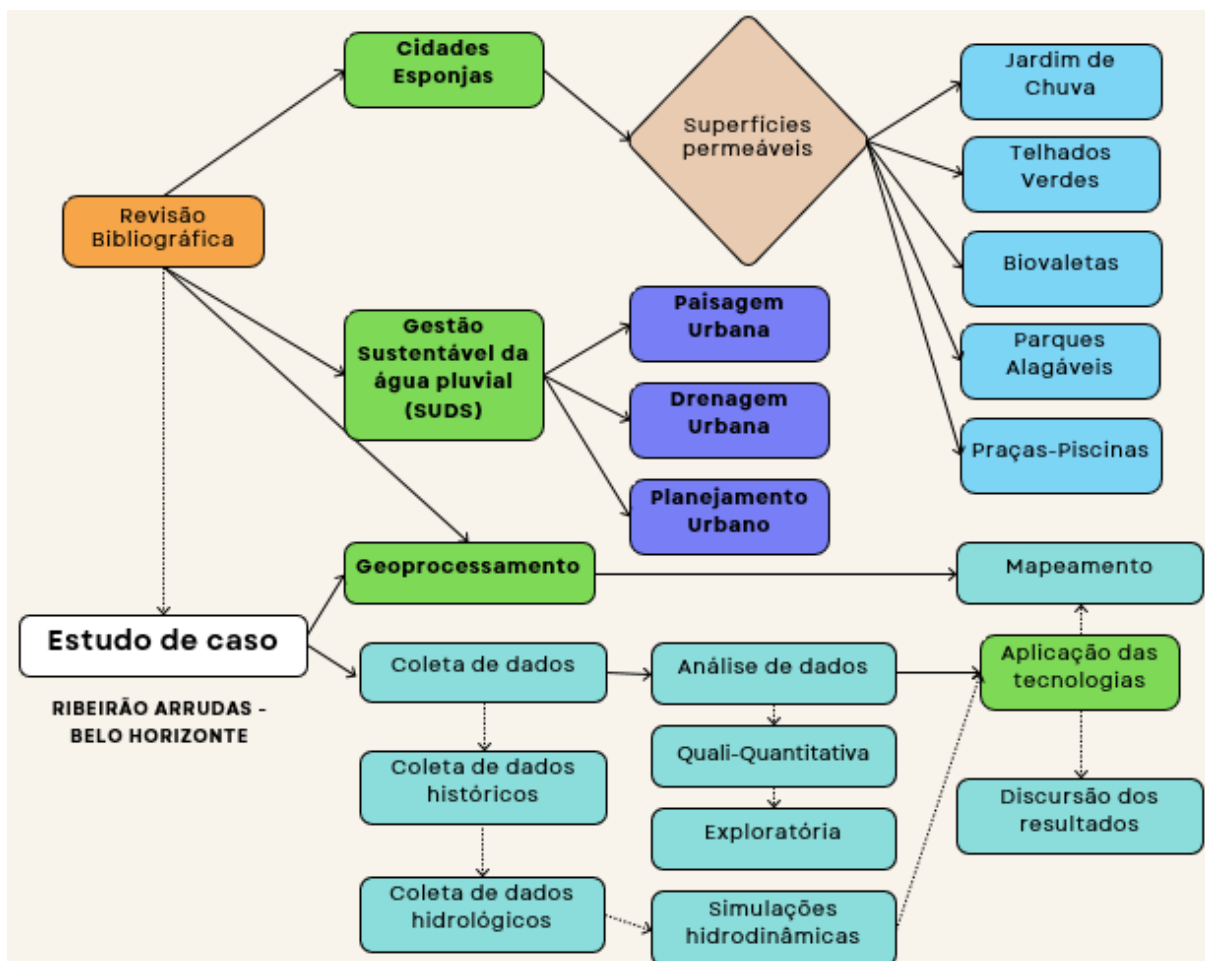
² A modelagem hidrodinâmica pode ser compreendida como um procedimento técnico que simula o comportamento da água em movimento, considerando variáveis como vazão, velocidade, nível d'água e interação com o relevo e as superfícies urbanas (USACE, 2025; Tucci, 2009; Canholi, 2005).

bibliográfica, coleta e análise de dados históricos e hidrológicos, mapeamentos elaborados com o uso do *software* QGIS (QGIS, 2023) as simulações hidrodinâmicas com o uso do programa aberto de modelagem hidrodinâmica, denominado HEC-RAS³ e desenvolvido pela USACE (2016, 2023, 2024a, 2024b, 2024c, 2025). As tecnologias como jardins de chuva (Moura, 2014; Carvalho, 2021), telhados verdes (Baldessar, 2012), biovaletas (Cormier e Pellegrino, 2008), parques alagáveis (Yu et al, 2015) e praças-piscinas (Hoyer et al., 2011) são propostas como estratégias sustentáveis.

Os resultados obtidos serão sistematizados e analisados criticamente, oferecendo subsídios para intervenções urbanas alinhadas à resiliência climática e ao manejo eficiente das águas pluviais.

³ O HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) é um software desenvolvido pelo United States Army Corps of Engineers (USACE) destinado à modelagem hidráulica e hidrodinâmica de sistemas fluviais. A ferramenta permite simular o escoamento da água em canais naturais e artificiais, considerando diferentes condições de regime, além de possibilitar a análise de variáveis como nível d'água, velocidade do fluxo e áreas suscetíveis a inundação (USACE, 2025).

Figura 32 - Esquema para o desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Autora, 2026.

Para isso, serão utilizados softwares de SIG, com destaque para o QGIS (QGIS, 2023), aplicados ao mapeamento e à gestão da água pluvial e do ambiente urbano. As análises contarão com o apoio de ferramentas como *Excel* (Pataro, 2019) para organização e exposição dos dados e da linguagem *Python* (Congedo, 2021), utilizada no processamento de bases de dados dentro do software QGIS (QGIS, 2023). A integração dessas tecnologias permitirá avaliar a viabilidade de implantação de SbN em Belo Horizonte. Foram utilizados dados hidrológicos, históricos e espaciais, analisados por meio dos sistemas de informações geográficas e simulações hidrodinâmicas.

Além disso, para o estudo de um software para a análise dos rios e os transbordamentos será realizado o mapeamento de inundações com o uso da ferramenta *HEC-RAS* (USACE, 2025). O aplicativo foi desenvolvido para realizar cálculos hidráulicos unidimensionais e bidimensionais para uma rede completa de

canais naturais e construídos. Com os quais realiza uma análise hidráulica, apresenta perfis de superfície de água de fluxo constante, com simulação de escoamento instável uni e bidimensional.

No final, foram realizados a análise, armazenamento e gerenciamento de dados e, como resultado, obteve-se o mapeamento. Com a finalidade de desenvolver mapas com mancha de inundação, o programa auxiliou no mapeamento dessas áreas na sub-bacia do Ribeirão Arrudas na Região Oeste, na Avenida Teresa Cristina, em um ponto crítico para inundações conforme mapa produzido pela Prefeitura de Belo Horizonte.

Em alinhamento com a metodologia adotada, tornou-se fundamental aprofundar no estudo de caso, o que permitiu relacionar os referenciais teóricos e as técnicas metodológicas discutidas com uma realidade concreta, evidenciando as potencialidades e limitações do emprego das geotecnologias. Nesse sentido, o próximo capítulo aborda o Ribeirão Arrudas e a cidade de Belo Horizonte, resgatando aspectos históricos e urbanos que estruturam a dinâmica territorial e socioambiental da área investigada.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Ribeirão Arrudas e Belo Horizonte - Contexto Histórico e Urbano

Compreender o atual cenário de inundações, degradação ambiental e conflitos territoriais em Belo Horizonte exige uma análise aprofundada do processo histórico que moldou a ocupação da cidade. A ausência de um planejamento urbano sustentável, especialmente no que diz respeito à integração dos cursos d'água no tecido urbano, é uma das principais causas do caos hídrico e ambiental que se observa na atualidade. Borsagli (2019) destaca que, desde o início do século XX, a canalização dos cursos d'água na capital mineira foi priorizada, contribuindo para a perda da função ecológica desses corpos hídricos e para o agravamento de eventos extremos, como enchentes e alagamentos.

A escolha do Ribeirão Arrudas como objeto de estudo se justifica não apenas por sua importância hidrológica, mas também por seu valor histórico e simbólico. O termo "ribeirão" refere-se a um curso d'água de porte intermediário entre um riacho e um rio, e "Arrudas" remete à antiga Fazenda de Francisco de Arruda de Sá, localizada no ponto de deságue do ribeirão (Silva, 2014). Antes da nomeação oficial, a população do antigo Arraial de Curral Del Rey já designava as regiões às margens do ribeirão com termos como Marzagão, Freitas, Cardoso e Calafate (Barreto, 1995). Segundo o historiador Abílio Barreto (Barreto, 1995), o nome original poderia ter sido Ribeirão Grande, demonstrando que a relação com a paisagem hídrica já existia mesmo antes da capital ser planejada.

O processo de urbanização de Belo Horizonte foi marcado pela exclusão dos cursos d'água do planejamento urbano, desconsiderando sua importância ecológica e funcional para a cidade conforme figura 33. Desde os primeiros traçados, a impermeabilização do solo e o desconhecimento da importância das áreas de várzeas contribuíram para o agravamento dos problemas de inundações e alagamentos recorrentes. Ribeirão Arrudas, principal corpo hídrico da cidade, foi um dos mais impactados por essa lógica urbana. Sua canalização teve início em 1928 como parte de uma estratégia de controle das águas, buscando conter os efeitos das cheias que afetavam o crescimento da capital (Souza, 2025; Borsagli, 2019).

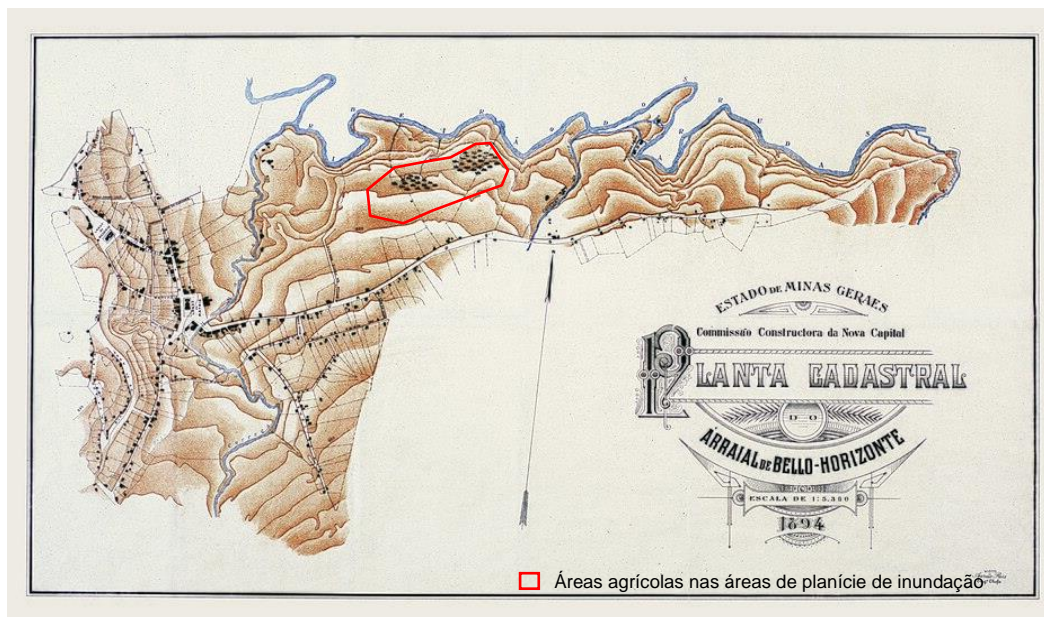
Figura 33 - Planta topográfica da Cidade de Minas Belo Horizonte (1895) com a retificação dos cursos d'água para o traçado ortogonal



Fonte: Arquivo Público Mineiro, 1895.

Até a década de 1890, as moradias da região mantinham certa distância dos cursos d'água, preservando as áreas alagáveis como locais de plantio e respeitando os limites naturais dos vales (figura 34). No entanto, a construção da nova capital mineira, formalizada em 1894 pela Comissão Construtora da Nova Capital (CCNC), desconsiderou por completo essas áreas ecologicamente frágeis. O projeto propôs a retificação do leito do Ribeirão Arrudas e dos córregos que nele desaguam (figura 35), eliminando seus meandros e substituindo-os por um traçado retilíneo e impermeável, que atendia aos critérios técnicos da engenharia da época, mas ignorava os impactos ambientais (Borsagli, 2019).

Figura 34 - Mapa do Arraial de Belo Horizonte em 1894



Fonte: Modificado de ACPBH acervo CCNC, 1894.

Figura 35 - Planta Cadastral da cidade de Belo Horizonte projetada pela CCNC com a retificação do curso natural do Ribeirão Arrudas



Fonte: Acervo Museu Histórico Abílio Barreto, 1996.

A comparação entre o Arraial de Belo Horizonte e o projeto ortogonal da nova capital revela uma ruptura significativa na forma como os cursos d'água passaram a ser tratados. A substituição dos leitos naturais por canais artificiais marca o início de uma urbanização que desconsidera a hidrografia local. Essa visão reducionista transformou os rios em problemas urbanos, ao invés de reconhecê-los como

elementos estruturantes da paisagem.

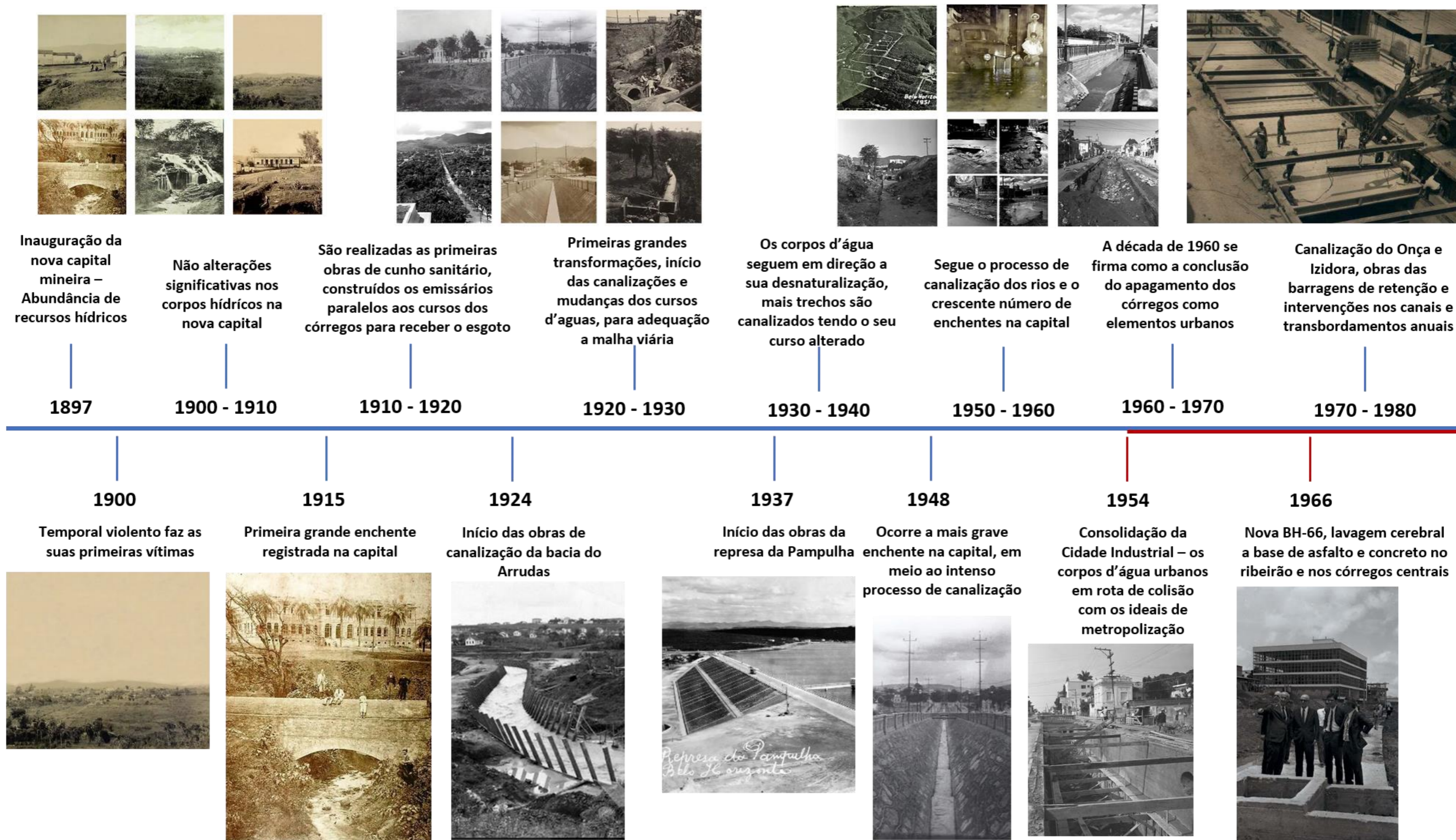
Segundo Pereira Costa (2006) o projeto urbanístico original de Belo Horizonte, elaborado por Aarão Reis, baseou-se em um traçado ortogonal rígido, idealizado para uma superfície plana e homogênea. No entanto, a mesma autora afirma que o território escolhido para a nova capital apresentava um relevo acidentado, com extensos vales e declividades suaves, incompatíveis com o modelo geométrico proposto. Para adaptar o projeto ao relevo natural, foram necessárias diversas intervenções, como a retificação e o desvio de cursos d'água, além da construção de pontes e viadutos. Esse modelo urbano reflete o pensamento técnico-positivista da época, no qual a racionalidade da engenharia era considerada superior às condições naturais do ambiente (Pereira Costa, 2006).

Como método para a compreensão do contexto histórico foi desenvolvida uma linha do tempo sobre a história do ribeirão e as intervenções hídricas na cidade de Belo Horizonte. A partir da compreensão histórica pode-se entender de maneira ampla os resultados de ações drásticas da alteração do seu curso d'água natural, da canalização e do fechamento da calha do ribeirão no contexto urbano da cidade (Borsagli, 2018). A linha do tempo histórica da canalização do Ribeirão Arrudas revela o impacto dessas decisões apresentada nas figuras 36 e 37.

Entre 1897 e 1930, a nova capital foi inaugurada em uma região rica em recursos hídricos (figura 36). Apesar das previsões de retificação no projeto, as intervenções significativas nos corpos d'água só ocorreram a partir das primeiras grandes enchentes, como a de 1915 (Borsagli, 2019). Na década de 1920, ocorre o início do processo de canalização do ribeirão, intensificando-se as modificações em seu curso natural para ajustar-se ao traçado ortogonal da cidade.

A figura 36 abrange o período entre 1930 e 1980, destacando a intensificação da desnaturalização dos corpos d'água, com a alteração de seus cursos e o crescente processo de canalização, que levou ao aumento das enchentes na capital. Nesse período, a urbanização se intensificou, acompanhada pela canalização do Ribeirão Arrudas e do Córrego do Onça, além da construção de barragens e obras de retenção. Em 1966, o slogan "Nova BH-66" sugeria que os problemas das enchentes seriam resolvidos com o uso de asfalto e concreto nos cursos d'água (Borsagli, 2018).

Figura 36 - Linha do tempo da história hídrica de Belo Horizonte de 1897 a 1980

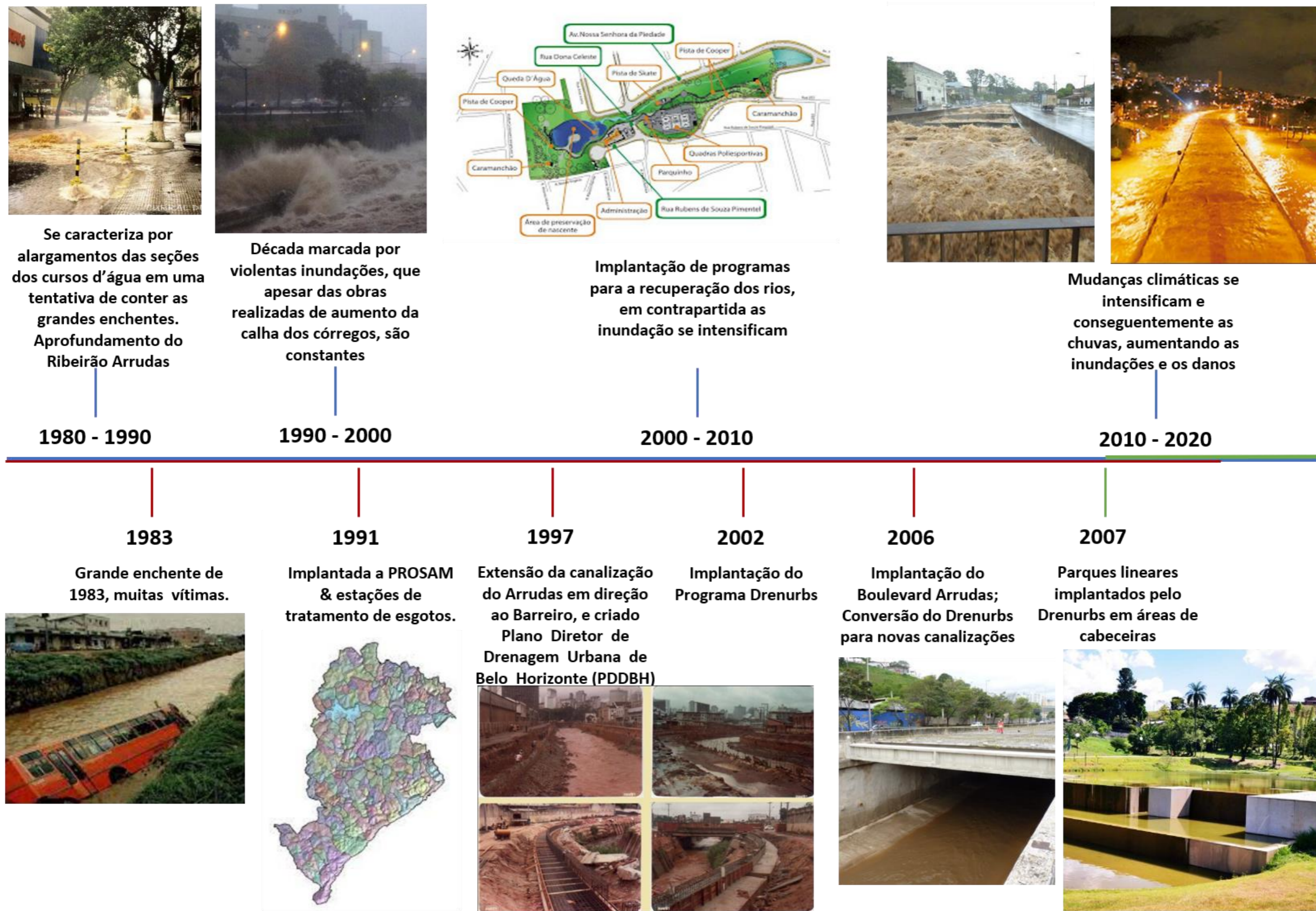


Fonte: Borsagli, 2018; adaptado pela autora, 2024.

A figura 37 abrange a história hídrica de Belo Horizonte entre 1980 e 2020. A década de 1980 foi marcada por intensos alagamentos e grandes enchentes, incluindo uma severa enchente em 1983 que resultou em várias vítimas. Apesar da expansão na calha do ribeirão e dos córregos adjacentes, os estragos e prejuízos se intensificaram na década seguinte. Em 1997, a canalização do Arrudas foi estendida até o Barreiro. No início dos anos 2000, foi criado o Programa de Recuperação Ambiental e Saneamento dos Cursos d'Água da Bacia do Ribeirão Arrudas e do Ribeirão Onça (Drenurbs), um programa de recuperação de córregos e nascentes que incluiu a implantação de parques lineares em várias regiões da capital.

A figura 37 também apresenta um recorte da linha do tempo entre o início dos anos 2000 e 2020. Nesse período, houve a implantação do Boulevard Arrudas e novas canalizações de córregos. Em contrapartida, as mudanças climáticas se intensificaram, provocando chuvas intensas e devastadoras que aumentaram as inundações e causaram inúmeros prejuízos. No entanto, vários parques lineares do programa Drenurbs foram implantados nas margens dos corpos hídricos, preservando as nascentes dos córregos.

Figura 37 - Linha do tempo da história hídrica de Belo Horizonte de 1980 a 2020



Fonte: Borsagli, 2018; adaptado pela autora, 2024.

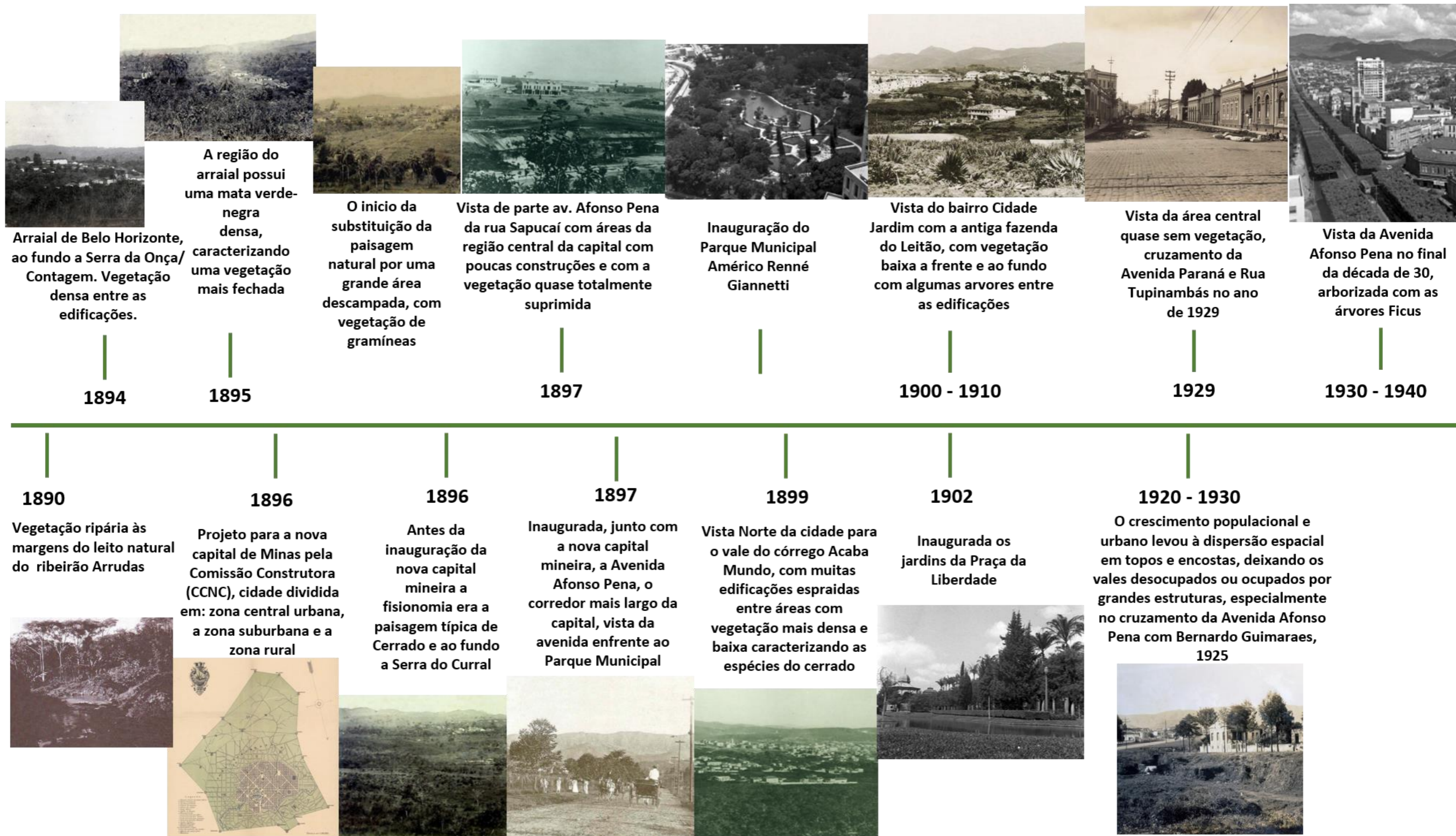
Ao longo dos anos, Belo Horizonte passou por profundas transformações em sua paisagem urbana. À medida que o centro urbano se expandia, as mudanças tornavam-se cada vez mais evidentes. No final do século XX, como mostram as imagens da linha do tempo (figura 38, 39 e 40), a antiga vila de Arraial de Curral Del Rey apresentava ainda poucas alterações na paisagem. Trata-se de um povoado com número reduzido de habitações e população fixa, escolhido como local para a construção da nova capital mineira. Os registros fotográficos iniciais revelam uma reduzida intervenção humana, com vegetação esparsa típica do bioma Cerrado, principalmente onde hoje se localiza o centro da cidade (Fernandes, 2014).

A linha do tempo evidencia a evolução da paisagem urbana e ambiental de Belo Horizonte, inicialmente caracterizada pela presença de vegetação densa entre as construções e mata ciliar as margens do leito natural do Ribeirão Arrudas. A região do antigo arraial contava com áreas de mata densa, que no início da ocupação urbana, foram substituídas por grandes áreas abertas, cobertas por vegetação rasteira e gramíneas. Antes da inauguração da capital, predominava uma paisagem natural que mesclava características do Cerrado e da Mata Atlântica, substituída progressivamente com o avanço da urbanização (Amaral, Costa e Muzzi, 2017).

Com o passar das décadas, houve uma perda significativa de cobertura vegetal, especialmente das matas ciliares, como resultado da canalização de córregos, entre eles o da Lagoinha em 1934 e o do Ribeirão Arrudas em 1942, bem como do crescimento urbano acelerado e desordenado entre os anos de 1960 e 1980 (figura 38). Esse processo comprometeu importantes ecossistemas e contribuiu para a intensificação de problemas ambientais, como alagamentos e perda de biodiversidade, refletindo o descaso com a lógica ambiental nos projetos urbanos da época.

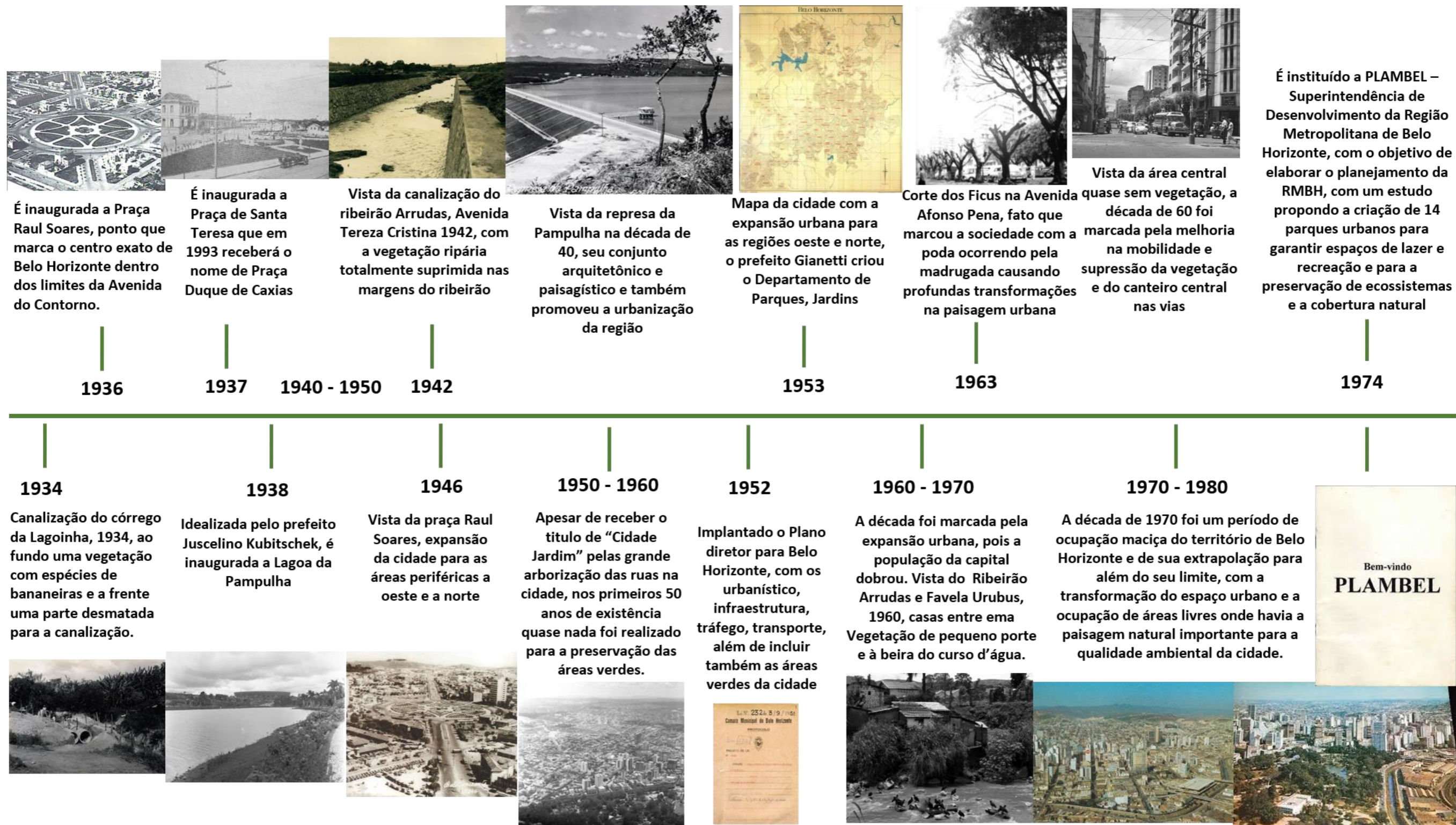
Desde 1983, com a criação da Secretaria Municipal de Meio Ambiente, começaram as ações voltadas à preservação ambiental. O Adote o Verde (1991), a Lei de Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo (Belo Horizonte-MG, 1996), os programas BH Verde (2002) e passaram a promover o mapeamento e a conservação de áreas verdes. Em 2012, os Planos Diretores Regionais reforçaram a implementação de parques, culminando no novo Plano Diretor de 2019, que estabeleceu diretrizes para a preservação ambiental e a criação de conexões verdes (figura 39). Belo Horizonte recebeu, em 2024, o título de “Cidade Árvore do Mundo” da ONU.

Figura 38 - Linha do tempo da história e da paisagem urbana de Belo Horizonte de 1897 a 1930



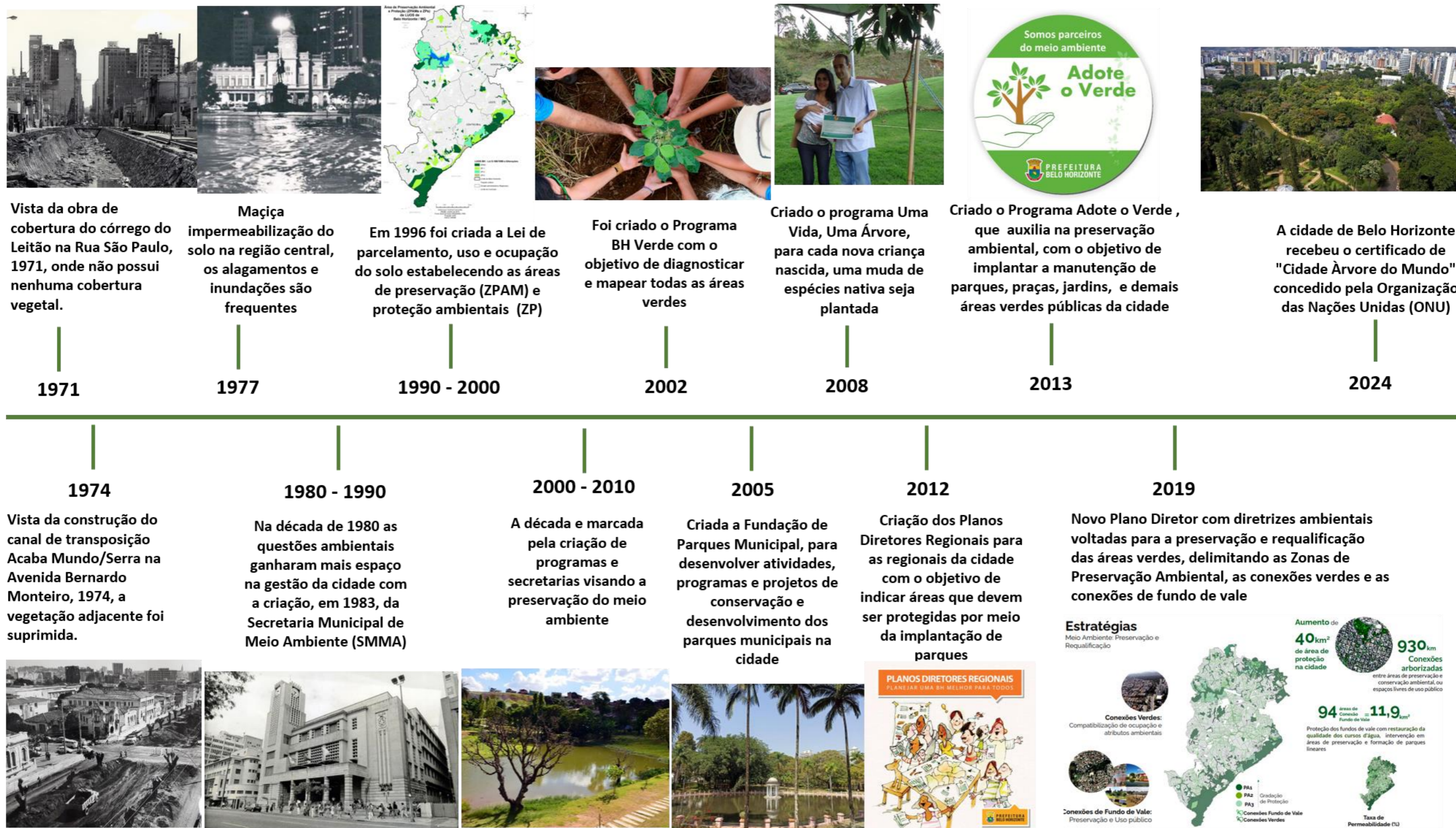
Fonte: Autora, 2024.

Figura 39 - Linha do tempo da história e da paisagem urbana de Belo Horizonte de 1930 a 1970



Fonte: Autora, 2024.

Figura 40 - Linha do tempo da história e da paisagem urbana de Belo Horizonte de 1970 a 2024



Fonte: Autora, 2024.

A análise histórica e evolutiva do Ribeirão Arrudas e da paisagem urbana de Belo Horizonte revela um processo marcado pela transformação intensa dos corpos hídricos e da ocupação urbana, refletindo as tensões entre modernização, infraestrutura e meio ambiente. Desde a inauguração da nova capital em 1897, a abundância de recursos hídricos foi gradualmente comprometida pelo avanço da urbanização. Iniciando-se com obras de saneamento e canalização dos córregos nas primeiras décadas do século XX, essas intervenções buscavam atender às demandas da malha viária e ao crescimento populacional. Nas décadas seguintes, a intensificação das canalizações e a impermeabilização do solo consolidaram um modelo de cidade industrial e modernista, onde os cursos d'água foram sistematicamente ocultados, resultando em enchentes recorrentes e no apagamento dos rios como elementos da paisagem (Costa, 2006; Monte-Mór, 2003; Baptista; Nascimento; Barraud, 2005; Tucci, 2008; Carvalho e Lima, 2009; Macedo, 2004).

A partir da segunda metade do século XX, mesmo com a implantação de represas, planos diretores e programas de drenagem, os episódios de inundação permaneceram recorrentes. Esse cenário revelou as limitações de um modelo de gestão fundamentado principalmente em soluções estruturais de controle hidráulico do escoamento, como a canalização e a contenção das cheias, que desconsideram a dinâmica natural da paisagem. Apenas nas últimas décadas, com iniciativas como o Drenurbs, os parques lineares e programas de preservação ambiental, surgem movimentos voltados à recuperação socioambiental dos cursos d'água, ainda que sob o desafio do adensamento urbano e das mudanças climáticas. Assim, o Ribeirão Arrudas se configura como um eixo revelador das contradições do urbanismo belo-horizontino, no qual as políticas de infraestrutura, planejamento urbano e meio ambiente se entrelaçam, conformando tanto os problemas quanto as possibilidades de resiliência da cidade contemporânea (Baptista; Nascimento; Barraud, 2005; Tucci, 2008; Costa, 2006; Belo Horizonte, 2023).

Dessa forma, o percurso histórico do Ribeirão Arrudas acompanha, de maneira indissociável, a própria evolução urbana de Belo Horizonte, evidenciando um processo contínuo de transformações pautadas pela canalização, retificação e ocultamento dos cursos d'água em nome do crescimento e da modernização da cidade. Esse movimento, ao mesmo tempo em que viabilizou a expansão urbana e a

consolidação de novas centralidades, produziu vulnerabilidades socioambientais expressas nas recorrentes enchentes e no apagamento da dimensão natural da paisagem (Costa, 2006; Monte-Mór, 2003; Baptista; Nascimento; Barraud, 2005; Canholi, 2005; Tucci, 2008; Belo Horizonte, 2023).

Ao reconhecer o Ribeirão Arrudas como um eixo que articula processos ecológicos e dinâmicas urbanas, abre-se caminho para uma leitura mais integrada da paisagem belo-horizontina, fundamentada em abordagens contemporâneas de planejamento da paisagem, como as propostas por McHarg (1969) e Forman e Godron (1986). Nessa perspectiva, a análise do suporte físico, o qual é marcado pelo relevo montanhoso, pela rede hidrográfica e pelos remanescentes de vegetação e da cobertura resultante dos processos de urbanização permite compreender de que maneira a cidade se estrutura, expande e adapta seus espaços (Amaral, Costa e Muzzi, 2017). Com isso, torna-se possível evidenciar a interação contínua entre condicionantes naturais e ações antrópicas. É a partir dessa articulação entre natureza e urbanização que se desenvolve o próximo tópico, dedicado à análise da paisagem de Belo Horizonte.

4.2 A Paisagem de Belo Horizonte

A paisagem de Belo Horizonte, desde sua concepção como capital planejada até sua posterior expansão e adensamento, revela um território marcado pela interação constante entre condicionantes naturais e processos antrópicos. Inserida em um contexto geomorfológico singular e atravessada por uma rede hidrográfica que estruturou historicamente sua ocupação, a cidade apresenta uma configuração paisagística resultante tanto das decisões de planejamento quanto das transformações socioeconômicas que se intensificaram ao longo do século XX (Costa, 2006; Monte-Mór, 2006; Ab'sáber, 2003; Tucci, 2008)

A leitura dessa paisagem exige, portanto, a integração entre sua base física com o relevo, a hidrografia e a cobertura vegetal, além das dinâmicas urbanas que continuamente remodelam suas formas e significados. A compreensão ampliada que se desenvolvem as reflexões seguintes, dedicadas a fundamentar os conceitos de paisagem e suas abordagens metodológicas (Pereira Costa et al., 2009; Maciel et al., 2009).

A paisagem, constitui um recorte da totalidade espacial e expressa simultaneamente processos naturais e sociais que se acumulam no tempo. Macedo (1999) a define como “produto” e “sistema”: produto porque resulta das formas de ocupação, manejo e transformação empreendidas pela sociedade sobre um território. E como sistema porque cada intervenção desencadeia respostas que se manifestam como alterações morfológicas, sejam parciais ou totais. Nesse contexto, a paisagem pode ser entendida como um fragmento do território que se configura e se transforma continuamente a partir das dinâmicas ambientais, econômicas e socioculturais que nela se entrelaçam, revelando sua natureza dinâmica e complexa (Laboratório da Paisagem, 2008).

Ao mesmo tempo, a paisagem apresenta uma dimensão perceptiva que depende das referências culturais, dos repertórios sensoriais e das experiências acumuladas pelos grupos sociais. A materialidade espacial não é percebida de modo homogêneo: diferentes atores identificam valores, símbolos e significados distintos no mesmo cenário. Ainda assim, essa percepção está ancorada em uma base física concreta, resultado de processos históricos e ecológicos que moldam a fisionomia observada em um dado momento. Assim, a paisagem configura-se como expressão visível da articulação entre tempo natural e tempo social, conjugando memória, transformação e permanência (Pereira Costa et al., 2009; Maciel et al., 2009).

Essa apreensão diferenciada do espaço também é mediada pelos sentidos, que permitem ao observador reconhecer elementos familiares, estranhar formas inesperadas e captar o surgimento de novas configurações no cotidiano. Esses recortes sensoriais, muitas vezes percebidos como unidades de paisagem, tornam-se fundamentais para compreender como indivíduos e coletividades constroem vínculos simbólicos com o território (Pereira Costa et al., 2009; Maciel et al., 2009).

Por isso, o estudo da paisagem requer a integração entre a materialidade, expressa pelo relevo, pela vegetação e pelas formas urbanas, e a subjetividade, que molda a leitura e a significação desses elementos. Importantes teorias contemporâneas de planejamento da paisagem como *Design with Nature* (McHarg, 1969), e a Ecologia da Paisagem (Forman e Godron, 1986) fundamentam o estudo sobre a paisagem de Belo Horizonte e oferecem referenciais essenciais para compreender a interação entre estrutura ecológica e dinâmica urbana.

O recorte de uma paisagem pode abarcar diferentes escalas, como um parque, um bairro, uma cidade, um vale ou uma bacia hidrográfica, definido conforme os objetivos investigativos e os critérios metodológicos adotados. Essa perspectiva converge com a formulação de Magnoli (1982), que concebe a paisagem como conformação, configuração e ação. A conformação refere-se à base física, a configuração diz respeito à organização espacial de seus elementos e a ação se refere aos processos que continuamente a transformam. Ao articular essas dimensões, torna-se possível compreender a paisagem não como um cenário estático, mas como um campo dinâmico de relações, permanentemente remodelado pela interação entre forças naturais e atividades humanas.

A paisagem de Belo Horizonte pode ser compreendida como um cenário construído a partir da interação entre o suporte físico natural e os processos históricos de urbanização que acompanharam a formação e a expansão da capital (Ab'sáber, 2003; Costa, 2006; Monte-Mór, 2006). Implantada sobre um sítio caracterizado por expressiva variação altimétrica, pela presença da Serra do Curral e por uma rede hidrográfica estruturante, a cidade apresenta uma paisagem na qual os elementos naturais inicialmente orientaram o desenho urbano, mas passaram a ser progressivamente tensionados pelo adensamento e pela expansão metropolitana (Ab'sáber, 2003; Costa, 2006; Monte-Mór, 2006; Tucci, 2008). Essa dinâmica resultou em uma paisagem urbana marcada pela coexistência de tecidos densamente edificados, áreas ambientalmente frágeis e espaços livres remanescentes, evidenciando as contradições entre o projeto original de cidade planejada e os processos efetivos de crescimento urbano (Pereira Costa et al., 2009; Maciel et al., 2009).

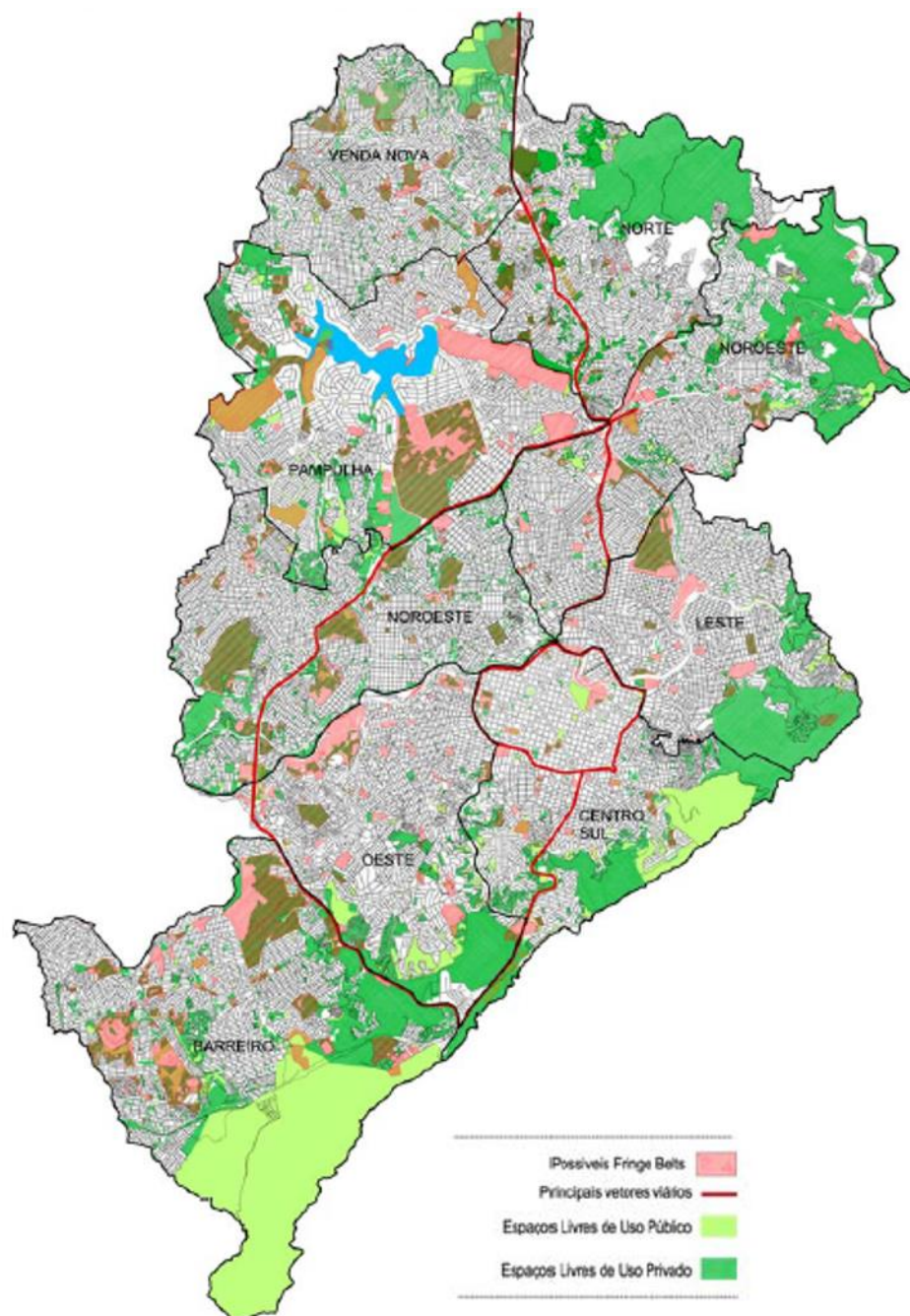
No campo da leitura morfológica da paisagem urbana, os primeiros estudos sobre *fringe belts* em Belo Horizonte contribuíram para identificar padrões de descontinuidade e permanência no processo de expansão da cidade. Segundo Costa et al. (2024) os *fringe belts* são como faixas territoriais caracterizadas por usos extensivos, baixa densidade construtiva e presença significativa de espaços livres, associadas a períodos de desaceleração do crescimento residencial. Os *fringe belts* constituem componentes morfológicos da cidade caracterizados por baixos índices de adensamento construtivo e pela predominância de usos institucionais, privados ou vinculados à propriedade pública com acesso controlado (Conzen, 2009). Eles

geralmente associados a eixos estruturantes ou linhas de fixação do crescimento urbano (Conzen, 2009).

No contexto belo-horizontino, tais franjas foram identificadas sobretudo em áreas ocupadas por grandes equipamentos urbanos, instituições, parques e cemitérios, muitas vezes implantados ao longo de eixos de infraestrutura ou limites naturais (figura 41). O mapeamento dessas áreas evidenciou seu papel estratégico como elementos morfológicos capazes de estruturar a paisagem urbana e de atuar como reservas espaciais e potenciais articuladores do sistema de espaços livres do município (Costa et al., 2009; Maciel et al., 2009).

Na figura 40 evidencia a organização territorial dos espaços livres no município de Belo Horizonte, distinguindo áreas de uso público, espaços livres privados e zonas identificadas como *fringe belts*. Nota-se que o tecido urbano mais consolidado ocupa grande parte da área central da cidade, enquanto os maiores contínuos de espaços livres concentram-se nas porções periféricas, sobretudo ao sul, sudeste e norte do município (Costa et al., 2024).

As áreas classificadas como *fringe belts* distribuem-se de forma descontínua, associadas a grandes parcelas do território com baixa intensidade de ocupação e presença de equipamentos urbanos ou áreas verdes. Esse arranjo espacial revela tanto a fragmentação dos espaços livres no interior da malha urbana quanto o potencial dessas áreas periféricas e intermediárias para a estruturação ambiental e a conectividade da paisagem de Belo Horizonte (Costa et al., 2024).

Figura 41 – Possíveis *fringe belts* e Espaços livres do município de Belo Horizonte

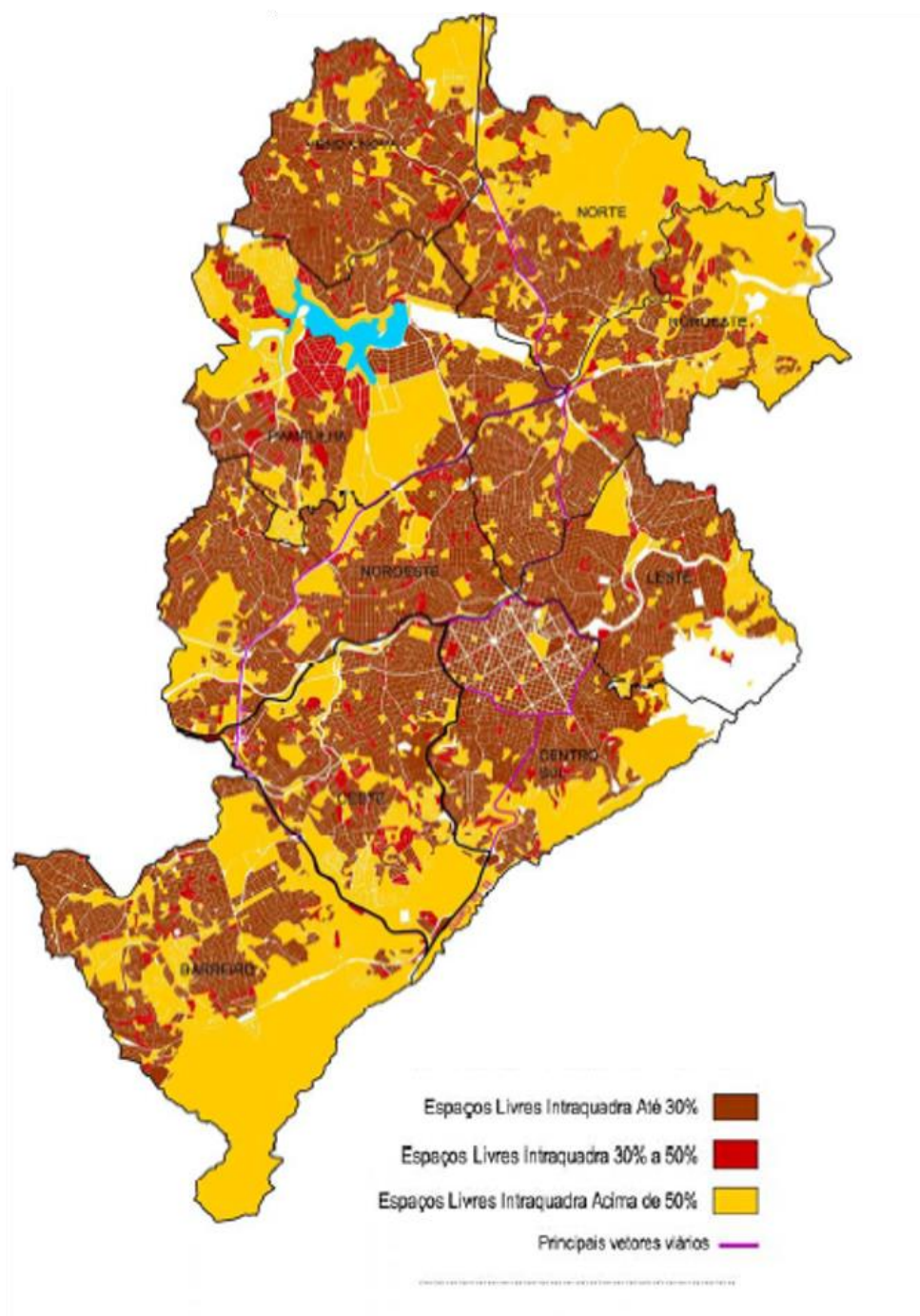
Fonte: Laboratório da Paisagem EA UFMG, 2009.

A cobertura vegetal original, composta por campos de altitude, cerrado e remanescentes de Mata Atlântica, foi amplamente suprimida ao longo do processo de urbanização, permanecendo de forma descontínua em áreas de preservação e em espaços livres públicos e privados. O mapa da figura 42 evidencia essa fragmentação ao analisar os espaços livres intraquadra, demonstrando a redução da permeabilidade do solo nas áreas centrais e a concentração de maiores estoques de áreas livres nas bordas urbanas e em grandes equipamentos, o que impacta diretamente a qualidade ambiental e a configuração da paisagem urbana (Costa et al., 2009b; Maciel et al., 2009).

A figura 42 apresenta a distribuição dos espaços livres intraquadra no município de Belo Horizonte, classificados segundo diferentes percentuais de área livre em relação à ocupação edificada. Observa-se a predominância de quadras com baixos índices de espaços livres até 30% sobretudo nas áreas centrais e em grande parte do tecido urbano consolidado, indicando elevada impermeabilização do solo.

As quadras com percentuais intermediários, entre 30% e 50%, distribuem-se de forma mais fragmentada, enquanto aquelas com mais de 50% de espaços livres concentram-se principalmente nas bordas do município, associadas a grandes equipamentos urbanos, áreas institucionais e vazios urbanos. Essa configuração evidencia o padrão desigual de distribuição dos espaços livres intraquadra e reforça as diferenças territoriais na qualidade ambiental da paisagem urbana de Belo Horizonte.

Figura 42 – Espaços Livres intraquadra no município de Belo Horizonte



Fonte: Laboratório da Paisagem, 2008.

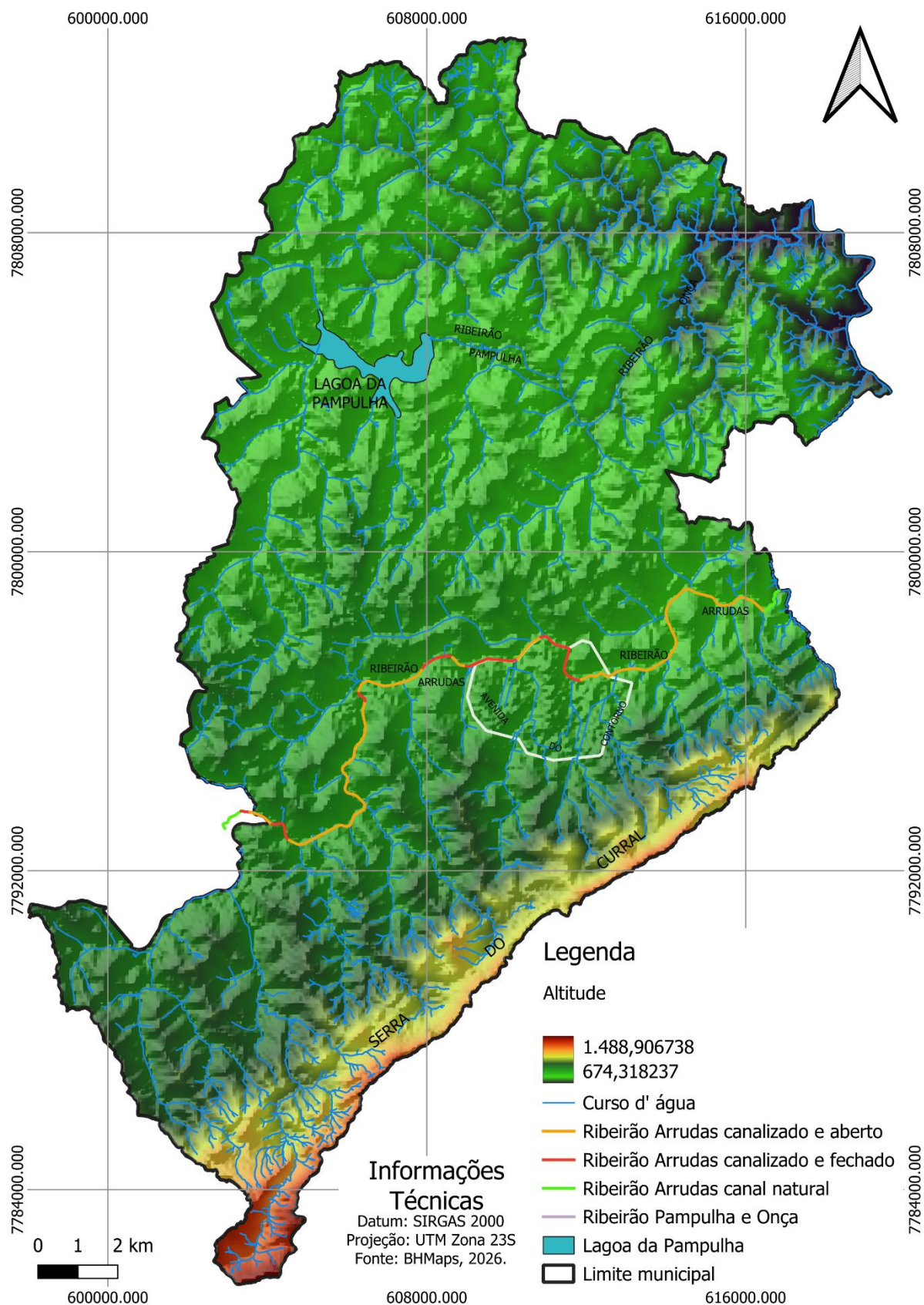
A análise integrada do suporte e da cobertura da paisagem de Belo Horizonte considerando relevo, vegetação e urbanização reforça a compreensão da cidade como um mosaico espacial complexo e fragmentado. O relevo acidentado da porção sul condicionou padrões diferenciados de ocupação, enquanto as áreas de menor declividade, especialmente ao norte, favoreceram processos de expansão urbana

mais intensos.

A figura 43 representa a configuração altimétrica e hidrográfica do município de Belo Horizonte, evidenciando a relação entre relevo e rede de drenagem. Observa-se a variação de altitude ao longo do território, com cotas mais elevadas concentradas na porção sul, associadas à Serra do Curral, e áreas progressivamente mais baixas em direção ao norte, onde se localiza a Lagoa da Pampulha.

A rede hidrográfica destaca os principais cursos d'água, como o Ribeirão Arrudas e o Ribeirão da Onça, indicando trechos com canalização aberta, fechada e segmentos não canalizados. Essa leitura integrada permite compreender como o relevo condiciona os fluxos hídricos e influencia os padrões de ocupação urbana, reforçando o papel estruturador das bacias hidrográficas na paisagem de Belo Horizonte (Ab'sáber, 2003; Tucci, 2008; Baptista; Nascimento; Barraud, 2005; Costa, 2006; Belo Horizonte, 2023).

Figura 43 – Relevo e principais curso d'água no município de Belo Horizonte



Fonte: Autora adaptado de Costa et al. (2009).

A partir desse panorama histórico e urbano, torna-se pertinente aprofundar a análise no contexto geohidrológico, de modo a estabelecer uma leitura mais abrangente da paisagem anteriormente discutida. Ao considerar o relevo, a rede de drenagem e os processos geomorfológicos que estruturam o território, torna-se possível compreender como as condições naturais da bacia hidrográfica interagem com a urbanização consolidada, influenciando a dinâmica dos escoamentos, a ocorrência de inundações e os limites da capacidade adaptativa da cidade (Ab'sáber, 2003; Tucci, 2008; Baptista; Nascimento; Barraud, 2005). Nesse sentido, o exame do contexto geohidrológico permite articular os aspectos físicos do sítio urbano aos desafios contemporâneos de resiliência hídrica, encerrando a abordagem da paisagem enquanto cenário e abrindo caminho para a análise dos processos que condicionam seu funcionamento ambiental.

4.3 Contexto Geohidrológico

Para uma compreensão mais ampla da dinâmica do Ribeirão Arrudas na paisagem, é fundamental considerar suporte geológico também o sistema de águas subterrâneas que compõe o ciclo hidrológico local. Segundo Reis (2012), o município de Belo Horizonte está inserido em dois sistemas aquíferos distintos: o primeiro, com maior abrangência areal, está relacionado às rochas do embasamento do cráton da Bacia do Rio São Francisco; o segundo, mais relevante em termos de volume de água armazenada, situa-se nas rochas metassedimentares do Supergrupo Minas, especialmente na porção sul do município.

O suporte geológico de Belo Horizonte é marcado pela predominância do Complexo Belo Horizonte, que ocupa cerca de 70% do território municipal e é constituído majoritariamente por rochas gnáissico-migmatíticas. Esse embasamento cristalino condiciona um relevo composto por espigões alongados, colinas de topos suavemente arqueados e encostas policonvexas com declividades variáveis, elementos que influenciaram de forma significativa os padrões iniciais de ocupação urbana e a conformação da malha viária (Costa et al., 2009b). A diversidade morfológica associada a esse domínio geológico contribui para a heterogeneidade da paisagem urbana e para a complexidade dos processos hidrológicos, especialmente no que se refere ao escoamento superficial e à suscetibilidade a

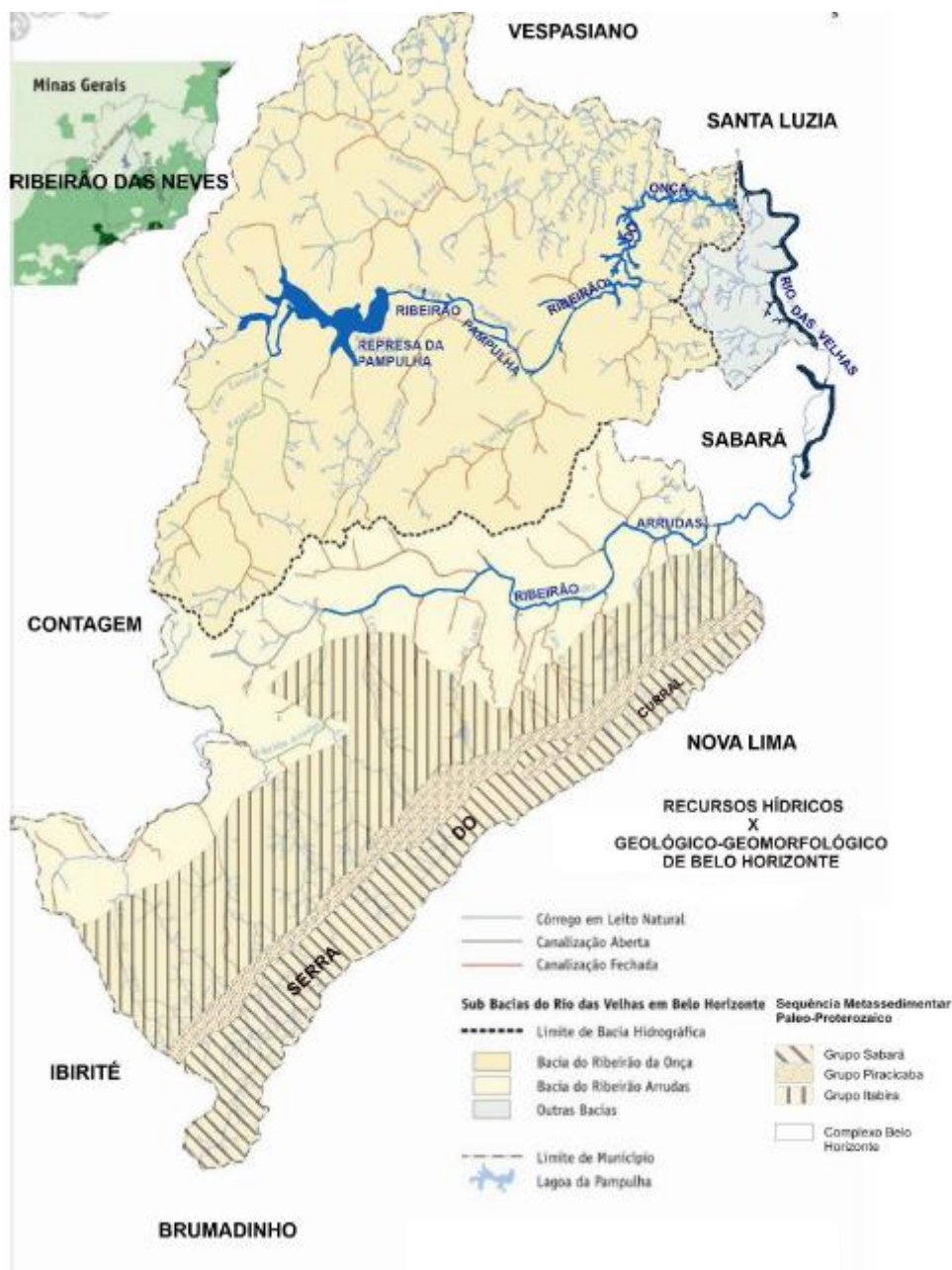
processos erosivos (Ab'sáber, 2003; Tucci, 2008; Baptista; Nascimento; Barraud, 2005).

Na porção sul do município, destaca-se o domínio das sequências metassedimentares, caracterizado por elevada diversidade litológica e relevo mais acidentado, com especial expressão na Serra do Curral. Integrante do Quadrilátero Ferrífero, esse domínio apresenta sucessões de rochas como itabiritos, dolomitos, quartzitos, filitos e xistos, sendo que as camadas de itabirito da Formação Cauê atingem altitudes próximas a 1.500 metros (Costa et al., 2009b).

A interface entre esse domínio e o Complexo Belo Horizonte dá origem a uma depressão estrutural que organiza a compartimentação das sub-bacias hidrográficas, por onde se desenvolve o curso do Ribeirão Arrudas, atravessando o município no sentido oeste-leste. Esses domínios geológicos inserem-se na bacia do rio das Velhas, afluente do rio São Francisco, e abrangem as sub-bacias dos ribeirões Arrudas, Pampulha e Onça, reforçando a estreita relação entre geologia, relevo e dinâmica hidrológica no território de Belo Horizonte conforme apresentado na figura 43 (Belo Horizonte, 1996; Costa et al., 2009b).

A figura 44 apresenta a organização dos recursos hídricos de Belo Horizonte em articulação com o suporte geológico-geomorfológico do município. Observa-se a delimitação das principais sub-bacias inseridas na bacia do rio das Velhas, com destaque para os ribeirões Arrudas, Onça e Pampulha, cujos cursos d'água se distribuem entre trechos em leito natural, canalizações abertas e canalizações fechadas. O mapa evidencia ainda a relação entre a rede de drenagem e os diferentes domínios geológicos, especialmente a transição entre o Complexo Belo Horizonte e as sequências metassedimentares do Quadrilátero Ferrífero ao sul do município, associadas à Serra do Curral. Essa configuração reforça o papel estruturante da geologia e do relevo na definição dos padrões de drenagem e na dinâmica hidrológica da cidade, bem como sua influência sobre os processos de ocupação urbana e gestão das águas.

Figura 44 - Belo Horizonte-Recursos Hídricos e Geomorfologia



Fonte: PBH, 2008 adaptado de Costa et al., 2009b.

A conexão entre águas superficiais e subterrâneas realça a complexidade da gestão hídrica urbana e a urgência de abordagens integradas. Devido a essas condições geológicas e geomorfológicas, o território de Belo Horizonte demonstra uma notável suscetibilidade a riscos geomorfológicos e hidrológicos, especificamente os vinculados à erosão, movimentos de massa e inundações urbanas. Encostas com declives acentuados, predominantemente nas áreas sobre as sequências metassedimentares do Quadrilátero Ferrífero, tornam-se mais suscetíveis a

escorregamentos quando o solo é impermeabilizado, sofre cortes inadequados e ocupações irregulares (Belo Horizonte, 1996; Amaral, Costa e Muzzi, 2017; Tucci, 2008).

Segundo Belo Horizonte (1996), Tucci (2008) e Canholi (2014) simultaneamente, a existência de depressões estruturais e vales encaixados, como os relacionados ao Ribeirão Arrudas e seus afluentes, facilita a concentração do escoamento superficial, o que intensifica episódios de cheias e inundações, principalmente em ambientes de alta urbanização e diminuição da capacidade de infiltração do solo. Com base nos autores esses quadros são exacerbados pela canalização dos cursos d'água e pela remoção da vegetação, delineando um cenário contínuo de vulnerabilidade socioambiental na cidade, fato amplamente atestado por estudos técnicos e pelo planejamento urbano municipal.

Este cenário de vulnerabilidade, profundamente enraizado nas características físicas do município e exacerbado pela ocupação antrópica, exige uma análise mais detalhada das particularidades de suas bacias hidrográficas. A bacia do Ribeirão Arrudas emerge como um exemplo fundamental dessa dinâmica, onde a compreensão do seu contexto geohidrológico é essencial para entender a evolução ambiental e urbana de Belo Horizonte (Ab'sáber, 2003; Tucci, 2008; Baptista; Nascimento; Barraud, 2005; Costa, 2006; Belo Horizonte, 2023).

O contexto geohidrológico do Ribeirão Arrudas constitui um elemento central para a compreensão da dinâmica ambiental e urbana de Belo Horizonte, uma vez que suas condições físicas e naturais exercem influência direta sobre os processos de ocupação do solo, a organização da drenagem urbana e a suscetibilidade a inundações. À luz da abordagem de *Design with Nature*, proposta por McHarg (1969), a paisagem deve ser compreendida como a sobreposição de camadas ambientais interdependentes, cuja leitura integrada orienta formas mais compatíveis de intervenção no território.

Inserido em uma bacia hidrográfica caracterizada por relevo acidentado, diversidade de solos e elevado grau de impermeabilização decorrente da urbanização, o Ribeirão Arrudas apresenta um comportamento hidrológico complexo quando avaliamos as diversas camadas ambientais na paisagem. A intensificação das cheias e dos alagamentos está associada à supressão das áreas de infiltração, à

canalização e à retificação dos cursos d'água, evidenciando o distanciamento entre a ocupação urbana e as condicionantes naturais da paisagem belo-horizontina (Tucci, 2008; Costa, 2006; Monte-Mór, 2006; Belo Horizonte, 2023).

A combinação entre declividade acentuada, solos de baixa capacidade de infiltração e elevada impermeabilização decorrente da urbanização tem acentuado a frequência e a magnitude das inundações. Dessa forma, compreender o contexto geohidrológico do Arrudas significa articular a análise de suas características físicas e naturais com os impactos das transformações antrópicas, constituindo um passo essencial para avaliar as vulnerabilidades hidrológicas e subsidiar estratégias de adaptação e resiliência urbana (Tucci, 2008; Costa, 2006; Monte-Mór, 2006).

Em consonância com essa leitura integrada da paisagem, a abordagem proposta por Delpoux contribui para aprofundar a compreensão do território ao considerar que qualquer porção da superfície terrestre pode ser analisada a partir da relação indissociável entre suporte e cobertura. Segundo Delpoux (1974), a paisagem resulta da combinação desses dois níveis estruturais, nos quais o suporte constituído pelos elementos físicos, como relevo, geologia e hidrografia interage com a cobertura, representada pelas formas de uso e ocupação do solo.

Essas unidades elementares podem ser organizadas em conjuntos mais amplos a partir de atributos comuns, permitindo reconhecer uma estrutura espacial horizontal complexa, composta por unidades que apresentam, verticalmente, essa bipartição fundamental. Tal sistematização possibilita a leitura integrada da paisagem e evidencia a existência de relações de determinismo entre seus componentes, aspecto essencial para interpretar os processos ambientais e urbanos que moldam a paisagem de Belo Horizonte (Delpoux, 1974).

A leitura da paisagem urbana de Belo Horizonte pode ser aprofundada a partir da articulação entre a concepção estrutural proposta por Delpoux e a lógica de sobreposição de camadas ambientais desenvolvida por McHarg. Delpoux (1974) enfatiza a paisagem como resultado da interação indissociável entre suporte e cobertura, evidenciando uma estrutura vertical bipartida que organiza o espaço em unidades elementares e seus agrupamentos. McHarg (1969) avança ao propor a análise integrada desses componentes por meio da sobreposição sistemática de informações ambientais, como relevo, geologia, hidrografia e usos do solo,

revelando compatibilidades e conflitos no processo de ocupação do território.

No contexto de Belo Horizonte, essa abordagem integrada permite compreender como as bacias hidrográficas urbanas se configuram como síntese dessas camadas físicas e antrópicas, refletindo tanto as condicionantes naturais do sítio quanto as transformações impostas pela urbanização. Nesse sentido, compreender o Arrudas para além de sua função como infraestrutura urbana permite situá-lo como um elemento estruturador da capital, passo essencial para avaliar as vulnerabilidades hidrológicas e subsidiar estratégias de adaptação e resiliência urbana.

4.4 O Ribeirão Arrudas

O Ribeirão Arrudas integra a Bacia do Rio das Velhas, que faz parte da Bacia hidrográfica do Rio São Francisco, em Minas Gerais. O ribeirão possui aproximadamente 44 km de extensão, nasce no município de Contagem, atravessando Belo Horizonte no sentido sudoeste-leste até desaguar no Rio das Velhas, em Sabará (Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas, 2016; Belo Horizonte, 2022). O Ribeirão Arrudas dentro dos limites municipais está próximo da Bacia do Ribeirão do Onça, Bacia do Rio das Velhas e a Bacia do Ribeirão Isidoro conforme figura 45.

A bacia hidrográfica possui uma área de 228,37 km², abrangendo áreas de relevo acidentado que variam entre 750 e 1.500 metros de altitude, o que favorece escoamentos concentrados e rápidos (Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas, 2016; Belo Horizonte, 2022). Os principais afluentes urbanos, como os córregos Leitão, Cercadinho, Serra e Acaba Mundo, desempenham papel determinante na dinâmica hidrológica da capital, sobretudo em eventos de chuva intensa.

Figura 45 - Bacia do Ribeirão Arrudas e as bacias adjacentes

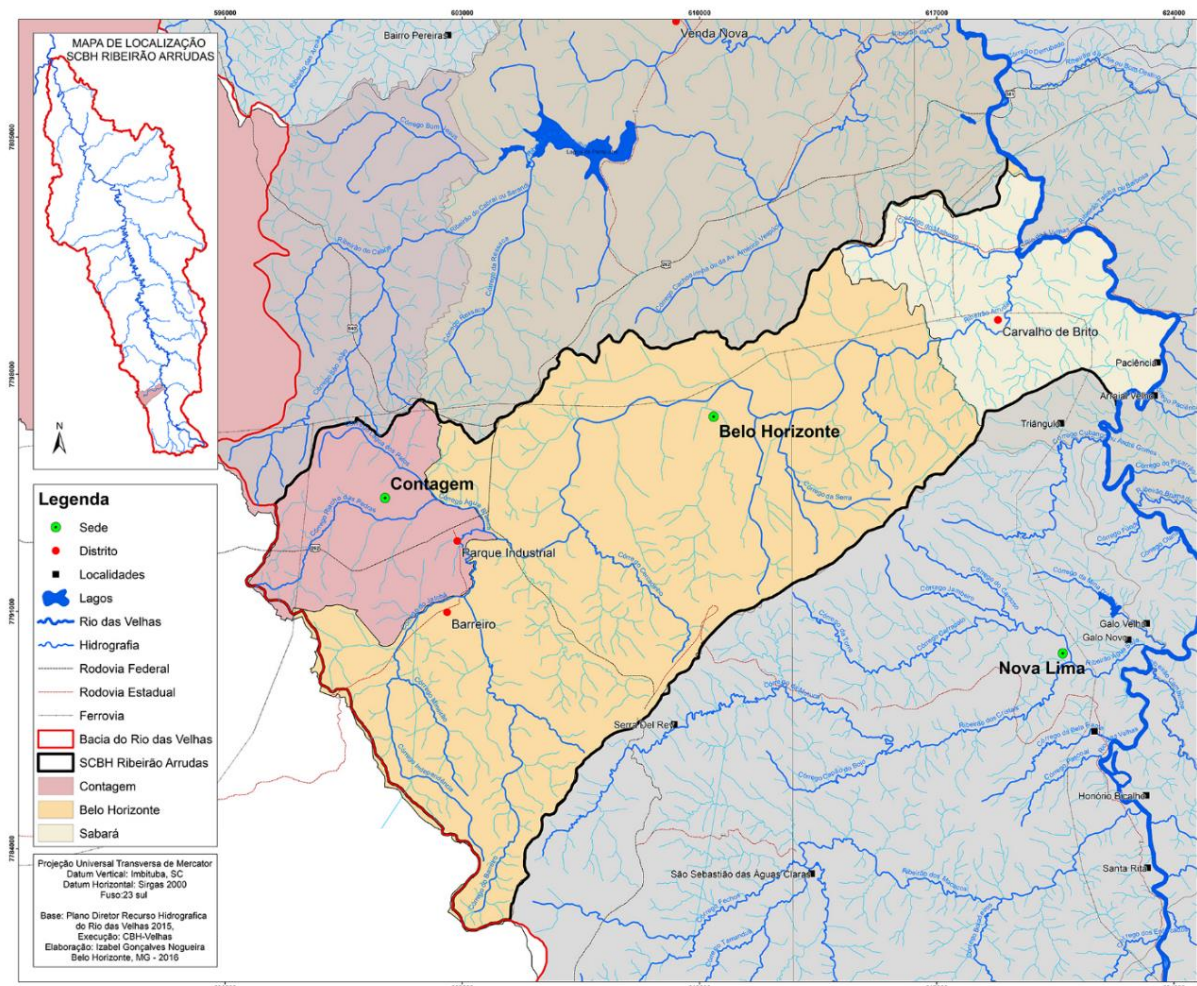


Fonte: Adaptado de Prefeitura de Belo Horizonte (PBH), 2010.

Na figura 46 têm-se o mapa com a delimitação da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Arrudas (SCBH Ribeirão Arrudas), destacando sua localização em relação à Bacia do Rio das Velhas e aos municípios de Belo Horizonte, Contagem, Sabará e Nova Lima. A bacia abrange áreas densamente urbanizadas, especialmente nas regiões de Belo Horizonte e Contagem. Essa configuração espacial confirma o papel estratégico do Ribeirão Arrudas tanto na dinâmica urbana quanto na vulnerabilidade

hidrológica da região metropolitana.

Figura 46 - Bacia hidrográfica do Ribeirão Arrudas



Fonte: Comitê das Bacias Hidrográficas Rio das Velhas (cbhvelhas), 2016.

Ao longo de seu processo de urbanização, o Ribeirão Arrudas passou a receber grandes volumes de efluentes domésticos e industriais (Sousa, 2017). De acordo com Goulart e Cruz (2012), as interações hidrodinâmicas e hidrogeoquímicas observadas nas águas que percorrem a calha do ribeirão revelam um sistema comprometido, com características físicas e químicas alteradas pelas intervenções humanas. A qualidade da água está intimamente relacionada à intensa urbanização, à impermeabilização das margens e à ausência de infraestrutura verde que favoreça processos naturais de filtragem e infiltração.

A dinâmica demográfica de Belo Horizonte desenvolve-se em um contexto de acelerada urbanização e expansão metropolitana, no qual a consolidação da cidade como polo regional se reflete no expressivo contingente populacional. Em 2022, o

município apresentou uma população estimada em 2.315.560 habitantes, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022). Esse crescimento urbano tem ocorrido de forma associada à ampliação das áreas edificadas e à progressiva impermeabilização do solo, fatores que incidem diretamente sobre os sistemas naturais da cidade. Nesse cenário, a intensificação da ocupação urbana, somada aos efeitos das mudanças climáticas globais, tem provocado alterações significativas no equilíbrio ambiental urbano, com impactos diretos sobre o funcionamento dos sistemas hídricos, como o Ribeirão Arrudas, historicamente pressionado pelas dinâmicas de uso e ocupação do solo (Razzaghmanesh et al., 2015; Oliveira et al., 2017).

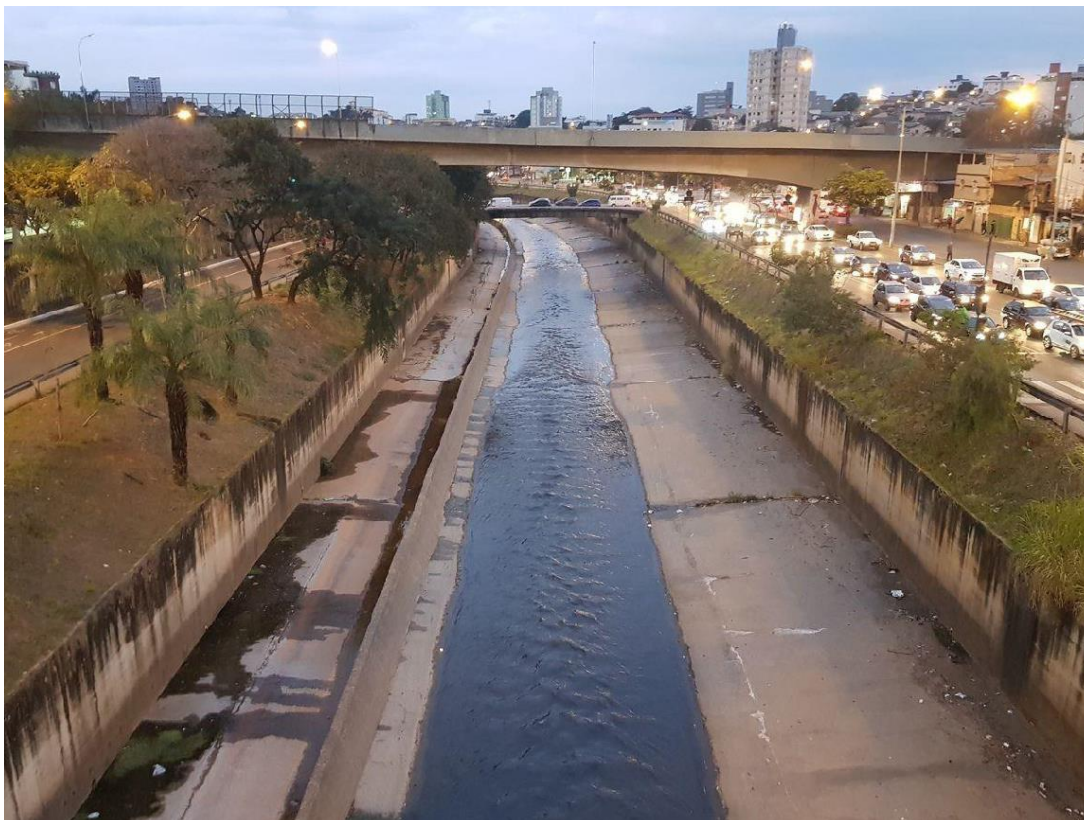
Nesse contexto de transformações urbanas e ambientais, os efeitos climáticos tornam-se um componente fundamental para a compreensão da paisagem belo-horizontina. Esta cidade enquadra-se no clima Tropical de Altitude (Cwa), segundo a classificação de Köppen, apresentando uma tendência consistente de elevação das temperaturas ao longo das últimas décadas. A análise da série histórica de temperaturas evidencia o aumento da frequência e da intensidade de eventos térmicos extremos, com destaque para o registro de 38,6 °C em 2023, valor que reforça o agravamento das condições térmicas no ambiente urbano (INMET, 2023).

Esse comportamento tem sido associado a fatores antrópicos, como o adensamento populacional, a expansão da frota de veículos e a redução das áreas vegetadas, que intensificam o fenômeno das ilhas de calor e afetam diretamente a dinâmica hidrológica urbana (Jardim; Silva, 2016). Ainda que a temperatura média anual histórica da cidade se mantenha em torno de 21,1 °C, observa-se que áreas situadas em maiores altitudes apresentam condições térmicas mais amenas, reforçando a influência do relevo e da ocupação urbana sobre o clima local (Assis, 2010).

A figura 47 ilustra um trecho do Ribeirão Arrudas onde é possível observar a canalização do leito e a presença de águas visivelmente poluídas, resultantes do lançamento contínuo de esgoto. Esse cenário é consequência direta do crescimento urbano desordenado nas áreas próximas ao ribeirão, sem o devido planejamento ambiental e urbano. Desde a fundação de Belo Horizonte, não foram implantadas medidas eficazes de preservação e proteção dos cursos d'água, o que permitiu que

o Arrudas se tornasse um receptor de resíduos líquidos ao longo de décadas.

Figura 47 - Vista aérea do Ribeirão Arrudas



Fonte: G1, 2013.

A ausência de políticas públicas voltadas para a proteção das águas, somada à canalização do leito do ribeirão, contribuiu significativamente para sua degradação. O processo de urbanização acelerada ao longo de suas margens favoreceu o lançamento de grandes volumes de efluentes domésticos, industriais e hospitalares diretamente no leito, além do acúmulo de resíduos sólidos. A impermeabilização do solo e a cobertura do ribeirão com estruturas de concreto apenas agravaram a situação, impedindo a regeneração natural do ecossistema aquático.

Esse modelo de ocupação urbana, que desconsidera as funções ecológicas dos corpos hídricos, não apenas compromete a qualidade da água, mas também contribui para a intensificação de enchentes e para o colapso dos sistemas de drenagem urbana. A poluição visível no trecho representado (figura 47) reforça os impactos negativos da histórica desvinculação entre o planejamento urbano e a lógica natural da paisagem. Nesse sentido, como ressalta McHarg (1969), quando o desenho da cidade ignora as condicionantes ambientais do território, os conflitos

entre os processos naturais e as intervenções antrópicas tendem a se intensificar, resultando em paisagens funcionalmente frágeis e ambientalmente insustentáveis.

A análise histórica e geohidrológica do Ribeirão Arrudas evidencia a relação entre a evolução urbana de Belo Horizonte e as transformações ambientais da bacia hidrográfica. A canalização e o avanço da urbanização favoreceram a expansão da cidade e a consolidação da infraestrutura. Contudo, esses processos geraram vulnerabilidades socioambientais, como inundações recorrentes, degradação da qualidade da água e apagamento dos rios da paisagem.

O Arrudas constitui não apenas um elemento físico da malha hidrográfica, mas também um registro das contradições entre os processos de modernização, o planejamento urbano e a resiliência ambiental. Nesse sentido, sua compreensão reforça a necessidade de abordagens integradas que articulem, de forma simultânea, a história urbana, a geomorfologia e a gestão hídrica no contexto da paisagem metropolitana.

A bacia do Ribeirão Arrudas constitui um recorte estratégico para a investigação das interações entre urbanização, infraestrutura hídrica e meio ambiente. Com base nesse referencial, o próximo capítulo apresenta os materiais e métodos adotados na pesquisa, com ênfase na área de estudo delimitada ao longo da Avenida Teresa Cristina, trecho onde os problemas de inundação, impermeabilização e planejamento urbano se manifestam de forma mais crítica.

5 MATERIAIS E MÉTODOS PARA A ANÁLISE INTEGRADA DAS ENCHENTES URBANAS NO RIBEIRÃO ARRUDAS, BELO HORIZONTE

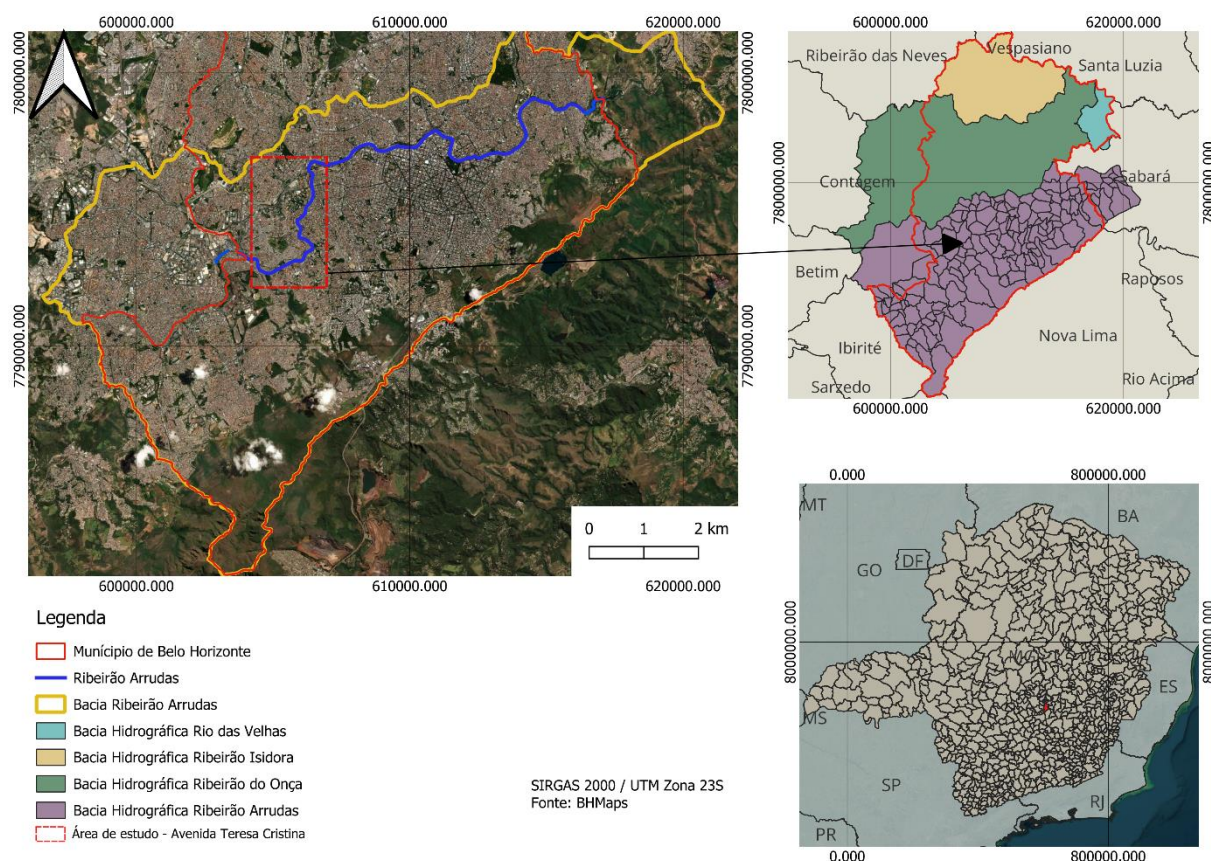
O presente capítulo descreve os materiais e métodos empregados na pesquisa, contemplando o delineamento experimental voltado à análise do Ribeirão Arrudas. Além das etapas de processamento e modelagem hidrodinâmica desenvolvidas no software *HEC-RAS* (USACE, 2025), a partir da utilização de dados do Modelo Digital de Elevação (MDE) *Sentinel-2* e do Modelo Digital do Terreno (MDT) disponibilizados pela Prefeitura de Belo Horizonte (2026) aplicados na área de estudo situada ao longo da Avenida Teresa Cristina.

5.1 Área de Estudo de Caso

A área de estudo está situada em um trecho da Avenida Teresa Cristina, na região oeste, uma das áreas com maior vulnerabilidade ambiental da cidade, que apresenta um dos maiores índices de enchentes em Belo Horizonte. Esse setor é caracterizado pela recorrência de inundações, evidenciado pela presença de manchas de alagamento ao longo de seu percurso, de acordo com a Carta de Inundações da Prefeitura de Belo Horizonte (Belo Horizonte, 2023). Diante desse cenário crítico, foi efetuado o mapeamento de possíveis intervenções e estratégias inspiradas no conceito de cidades esponja, com o objetivo de mitigar os impactos das chuvas intensas.

A figura 48 apresenta o mapa de localização da área de estudo no município de Belo Horizonte, com destaque para o Ribeirão Arrudas. A região escolhida representa um ponto estratégico para a aplicação de medidas de drenagem urbana sustentável, dado seu histórico de enchentes frequentes e sua importância para o sistema hídrico da cidade. Além disso, o mapa localiza a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Arrudas e as bacias hidrográficas adjacentes: Ribeirão do Onça, Ribeirão Izidora e Rio das Velhas.

Figura 48 - Localização da área de estudo na bacia hidrográfica do Ribeirão Arrudas em Belo Horizonte – Minas Gerais



Fonte: Autora, 2026.

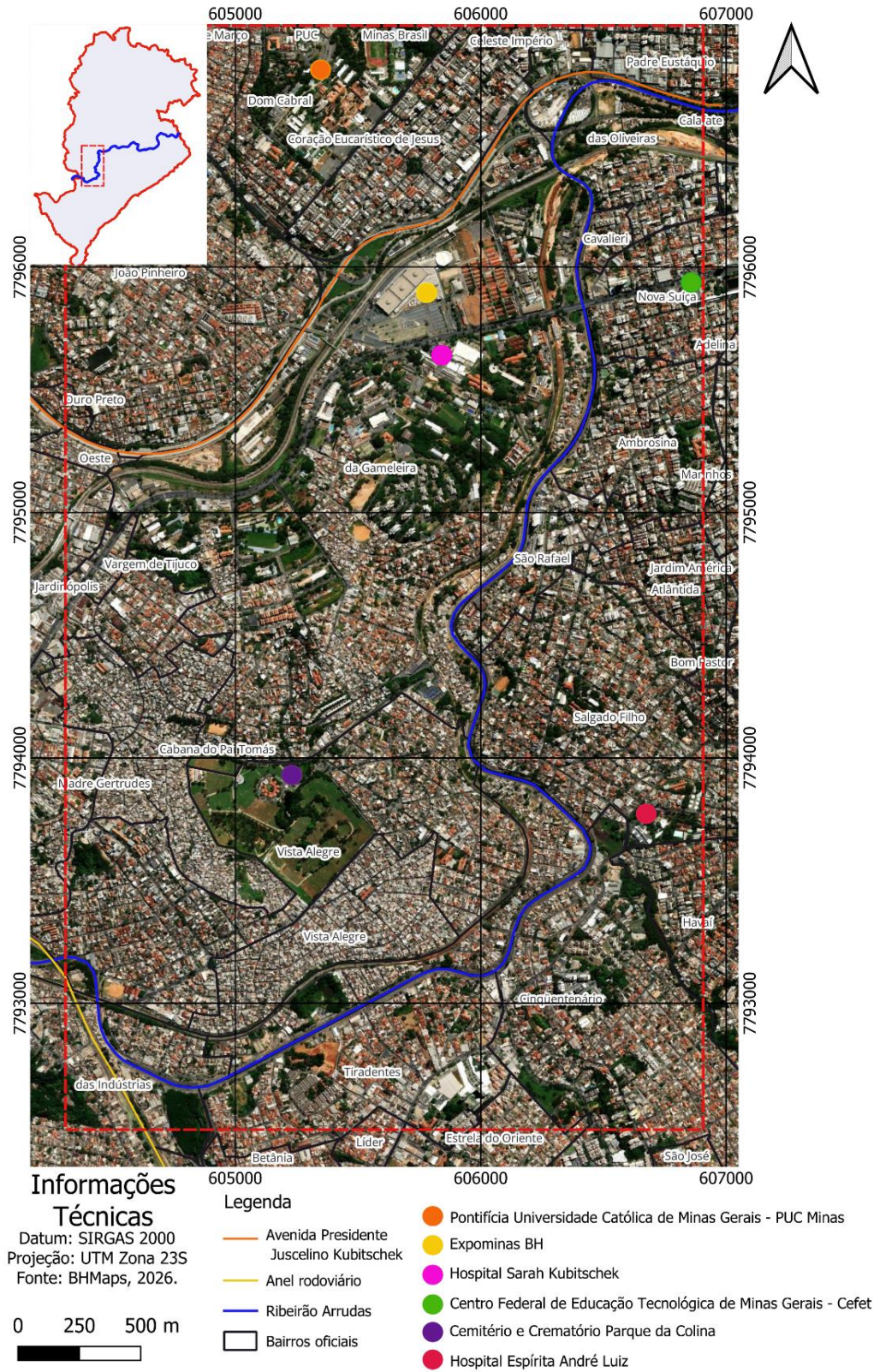
Na figura 49 a área de estudo delimitada corresponde ao trecho do Ribeirão Arrudas na Avenida Teresa Cristina situado entre o Anel Rodoviário e a Avenida Presidente Juscelino Kubitschek. Destacam-se, na área de estudo, importantes marcos da paisagem urbana, como o Expominas, o Cemitério e Crematório Parque da Colina, o Hospital Sarah Kubitschek, a Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas), o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) e o Hospital Espírita André Luiz, que contribuem para a estruturação funcional e simbólica do território.

A área de estudo, delimitada pela linha pontilhada em vermelho (figura 49), abrange bairros consolidados da região Oeste de Belo Horizonte, destacando-se Dom Cabral, Padre Eustáquio, Salgado Filho, Calafate, Nova Suíça, Coração Eucarístico, Gameleira, São Rafael, Vista Alegre, Betânia, Tirol e Havaí, entre outros adjacentes. Esses bairros apresentam perfis socioeconômicos distintos, refletindo a heterogeneidade urbana do território. De modo geral, observa-se a presença de uma

população de classe média, com renda média domiciliar variando aproximadamente entre 2 e 6 salários mínimos, segundo dados do IBGE (2022). Bairros como Padre Eustáquio, Nova Suíça e Coração Eucarístico tendem a apresentar rendas médias mais elevadas e maior consolidação urbana, enquanto áreas como Betânia, Tirol e Havaí apresentam maior diversidade socioeconômica e, em alguns trechos, maior vulnerabilidade. A população desses bairros, somada, representa um contingente significativo com um estimado em mais de 150 mil habitantes, com isso evidenciando a relevância da área de estudo e o impacto potencial das intervenções propostas sobre um público amplo e socialmente diverso.

Conforme a imagem, trata-se de um setor densamente urbanizado, caracterizado por elevada impermeabilização do solo, extensa malha viária, ocupações residenciais e comerciais consolidadas. O canal do Arrudas, representado em azul, encontra-se confinado por infraestrutura urbana e vias expressas, evidenciando o processo histórico de retificação e canalização. Esse trecho, localizado em uma região estratégica da capital, concentra recorrentes episódios de inundações, o que o torna um recorte relevante para a análise hidrodinâmica e para a compreensão das interações entre urbanização e o contexto justificado.

Figura 49 - Localização da área de estudo Ribeirão Arrudas – Avenida Teresa Cristina



Fonte: Autora, 2026.

O delineamento experimental do Ribeirão Arrudas, ao longo da Avenida Teresa Cristina estabelece os procedimentos adotados para a representação e simulação hidrodinâmica do canal, definindo os parâmetros físicos, espaciais e hidrológicos que orientam a aplicação das ferramentas de modelagem.

5.2 Delineamento Experimental do Ribeirão Arrudas

O delineamento experimental foi estruturado a partir de um conjunto de decisões metodológicas que definiram a estruturação do experimento e as variáveis analisadas para a caracterização do canal do ribeirão. Segundo Sampaio et al. (2008), o delineamento experimental permite o estabelecimento de relações causais, ao manipular variáveis independentes e observar seus efeitos sobre variáveis dependentes, mantendo sob controle fatores estranhos ou de confusão. Este estudo analisou o canal do Ribeirão Arrudas ao longo da Avenida Teresa Cristina, definindo seções de canal aberto e canal fechado.

O trecho do Ribeirão Arrudas demarcado na área de estudo, compreendido ao longo da Avenida Teresa Cristina, apresenta predominância de canal aberto e canalizado, conforme indicado em verde na figura 50. Essa configuração reflete intervenções históricas de retificação e contenção das margens, que buscaram adequar o curso d'água à intensa ocupação urbana do entorno. O canal aberto, embora permita a visibilidade do curso do ribeirão, encontra-se rigidamente confinado por taludes concretados e vias expressas, evidenciando as características da drenagem urbana. Essa característica reduz a capacidade de interação do ribeirão com suas áreas marginais, intensificando os processos de escoamento superficial e de transporte rápido de cheias (figura 50).

Figura 50 - Análise do canal do Ribeirão Arrudas – Avenida Teresa Cristina



Fonte: Autora, 2026.

Além disso, o mapa evidencia trechos de canal fechado e canalizado (em roxo), especialmente em áreas de maior adensamento construtivo, onde o leito do ribeirão foi totalmente coberto e conduzido por estruturas subterrâneas para viabilizar a expansão da malha urbana. Embora essa solução libere espaço na superfície, ela reduz a capacidade de dissipação natural das cheias e intensifica os riscos de alagamentos a jusante.

Os diferentes tipos de canalização nesse setor do Arrudas revelam um processo de urbanização que priorizou a infraestrutura viária e a ocupação do solo em detrimento das funções ambientais e hidrológicas do curso d'água, configurando um cenário crítico para a análise hidrodinâmica e para a proposição de SbN. Com o delineamento foi realizado o levantamento fotográfico do trecho de estudo apresentando as áreas do canal aberto e canalizado (figura 51) e do canal fechado e canalizado (figura 52).

Figura 51 - Canal aberto e canalizado no ribeirão



Fonte: Autora, 2026.

Figura 52 - Canal fechado e canalizado no ribeirão



Fonte: Autora, 2026.

A partir do delineamento experimental, que estruturou a caracterização física e espacial do canal e definiu os parâmetros necessários para a análise, avança-se para a etapa de simulações hidrodinâmicas no *HEC-RAS* (USACE, 2025). O uso de Modelos Digitais de Elevação (MDE) derivados do Sentinel-2, em conjunto com o MDT disponibilizado pela Prefeitura de Belo Horizonte (2026), permite representar com maior precisão a topografia do terreno. Essa integração possibilita a avaliação do escoamento superficial e dos processos de inundação ao longo do trecho analisado, fornecendo subsídios técnicos para compreender os efeitos da impermeabilização, do adensamento urbano e das alterações do canal.

5.3 Simulações Hidrodinâmicas no *HEC-RAS* com uso de MDE Sentinel-2

As simulações hidrodinâmicas no *HEC-RAS* (USACE, 2025) constituem uma etapa fundamental para a compreensão do comportamento hidrodinâmico do Ribeirão Arrudas, permitindo analisar a formação de áreas de inundação em diferentes cenários. Para este estudo, foram utilizados o Modelo Digital de Elevação (MDE)

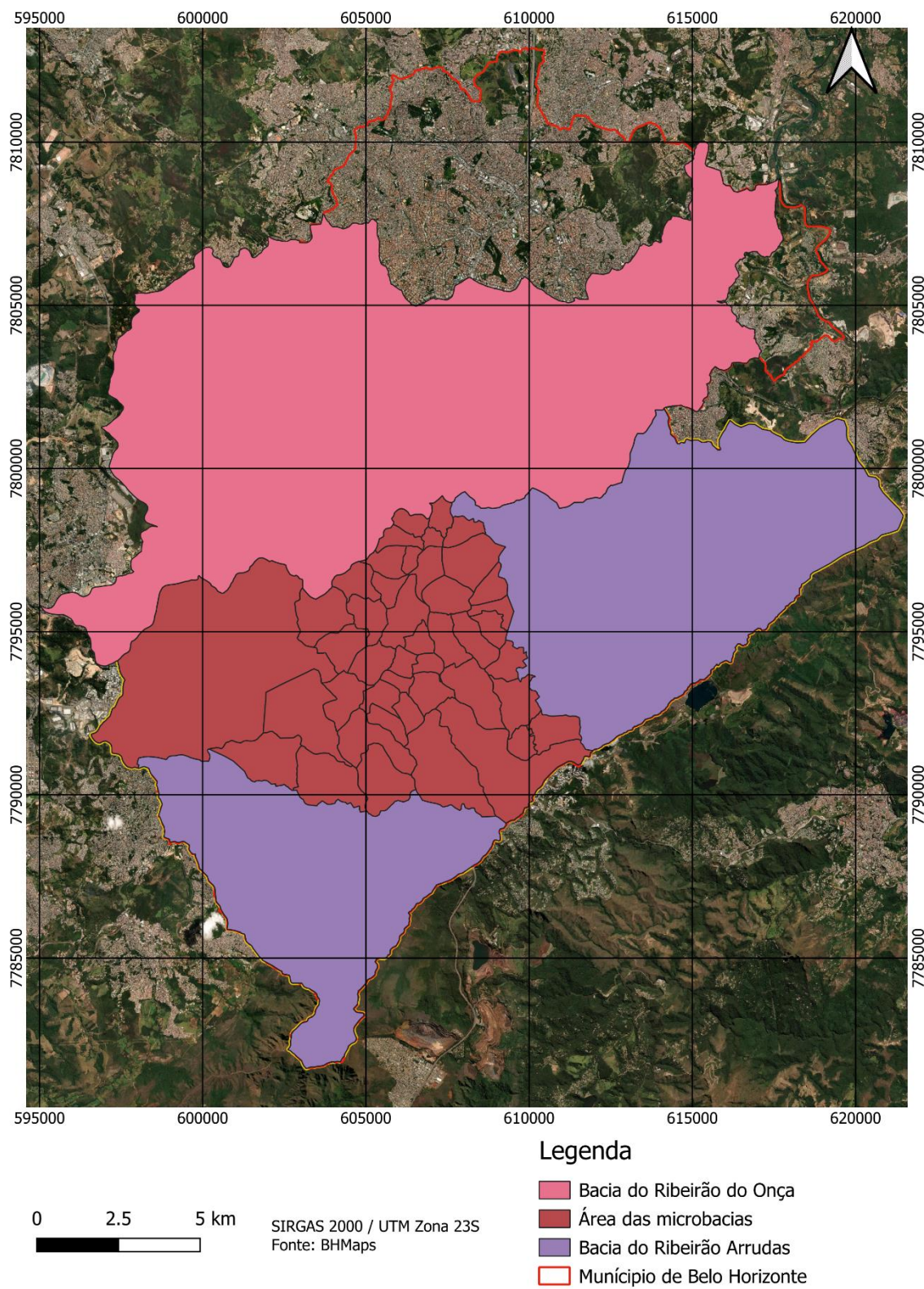
obtido a partir de imagens *Sentinel-2*, que forneceram a base topográfica necessária para a modelagem. A integração desses dados com a ferramenta computacional possibilitou a representação tridimensional do canal e de sua bacia de contribuição imediata, garantindo a estimativa dos impactos da impermeabilização urbana, da retificação do curso d'água e das condições geomorfológicas nos períodos de cheias.

Para realizar a construção e simulação de um modelo hidrodinâmico no *software HEC-RAS* (USACE, 2025) versão 6.6 foi necessária a obtenção dos dados das estações fluviométricas na Bacia do Ribeirão Arrudas, dados de declividade (*normal depth*), dados de rugosidade do solo e do uso e ocupação do solo para auxiliar na definição adequada de um coeficiente de *Manning*, o Modelo Digital de Elevação (MDE) produzido com o auxílio do *software* de geoprocessamento QGIS (QGIS, 2023).

O MDE foi produzido a partir das imagens do satélite *Sentinel-2* que faz parte de uma missão de imageamento multiespectral do Programa GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*), gerenciado em conjunto pela Comunidade Europeia e pela ESA. Os sensores possuem alta resolução espacial (10 metros) e um curto intervalo de revisita (5 dias), assegurando a continuidade dos dados anteriormente fornecidos pelos satélites *SPOT 5* e *Landsat 7*. A resolução radiométrica dos sensores é de 12 *bits* por *pixel*, sendo que os produtos *Sentinel-2* são entregues em cenas ortorretificadas de 100 km por 100 km, estruturadas em uma grade própria no sistema de coordenadas UTM/WGS84 (Phiri et al, 2020).

Para a construção do modelo o processo de simulação iniciou-se com a escolha das microbacias e o recorte do MDE *Sentinel-2* com resolução espacial de 10 m, utilizando-se o *software* QGIS (QGIS, 2023). O recorte foi realizado a partir do *shapefile* das microbacias que delimitam a área de estudo, permitindo gerar um modelo digital ajustado ao limite hidrográfico local (figura 53). Esse procedimento assegura que as análises subsequentes se restrinjam ao espaço físico da bacia, garantindo precisão na representação do relevo e das condições de escoamento superficial.

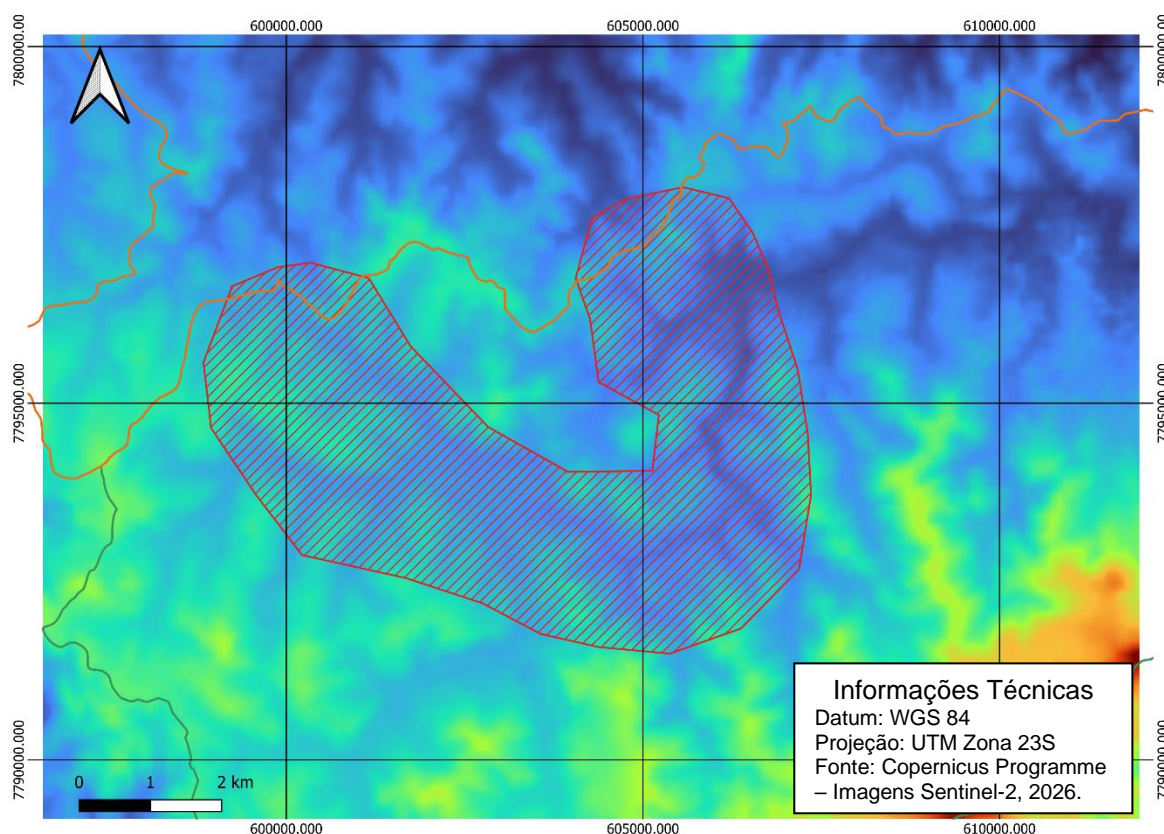
Figura 53 - Recorte das Microbacias na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Arrudas



Fonte: Autora, 2026.

A etapa seguinte consistiu na produção do *merge* no *HEC-RAS* (USACE, 2025), a partir da inserção do MDE recortado no plugin-in *RAS Mapper*. Nessa fase, a geometria do modelo foi construída por meio da função *Merge*, definindo a área da simulação e os limites de montante (*BC Line Up*) e jusante (*BC Line Down*). Essa configuração espacial é fundamental para estabelecer o domínio a ser modelado, determinando onde as vazões serão inseridas e para onde o fluxo será direcionado, simulando o comportamento real do canal no trecho estudado. Na figura 54 apresenta-se a imagem do MDE *Sentinel-2* e a área delimitado pelo *merge*.

Figura 54 - Modelo digital de elevação (MDE) com área do *Merge* inserida nas Bacias do Ribeirão Arrudas e Ribeirão do Onça



Fonte: GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) modificado pela autora, 2026.

Posteriormente, procedeu-se a inserção dos dados hidrológicos, com as séries de vazão no módulo *Flow Hydrograph* do *HEC-RAS* (USACE, 2025) e a definição da declividade por meio da condição de contorno *Normal Depth*. Os dados de vazão utilizados foram obtidos da estação fluviométrica 41200430 – Raposos, referente ao período de 23/01/2024 a 27/01/2024, por se tratar da série mais recente disponível, ainda que a estação se situe a uma distância considerável da área de estudo. O

dado de entrada de declividade do canal foi preenchido na aba de profundidade normal (*normal depth*) considerando a declividade média aproximada de 0,209 % no último trecho a jusante da área de estudo. Estes valores foram obtidos através do Plano de Drenagem de Belo Horizonte (Belo Horizonte, 2002).

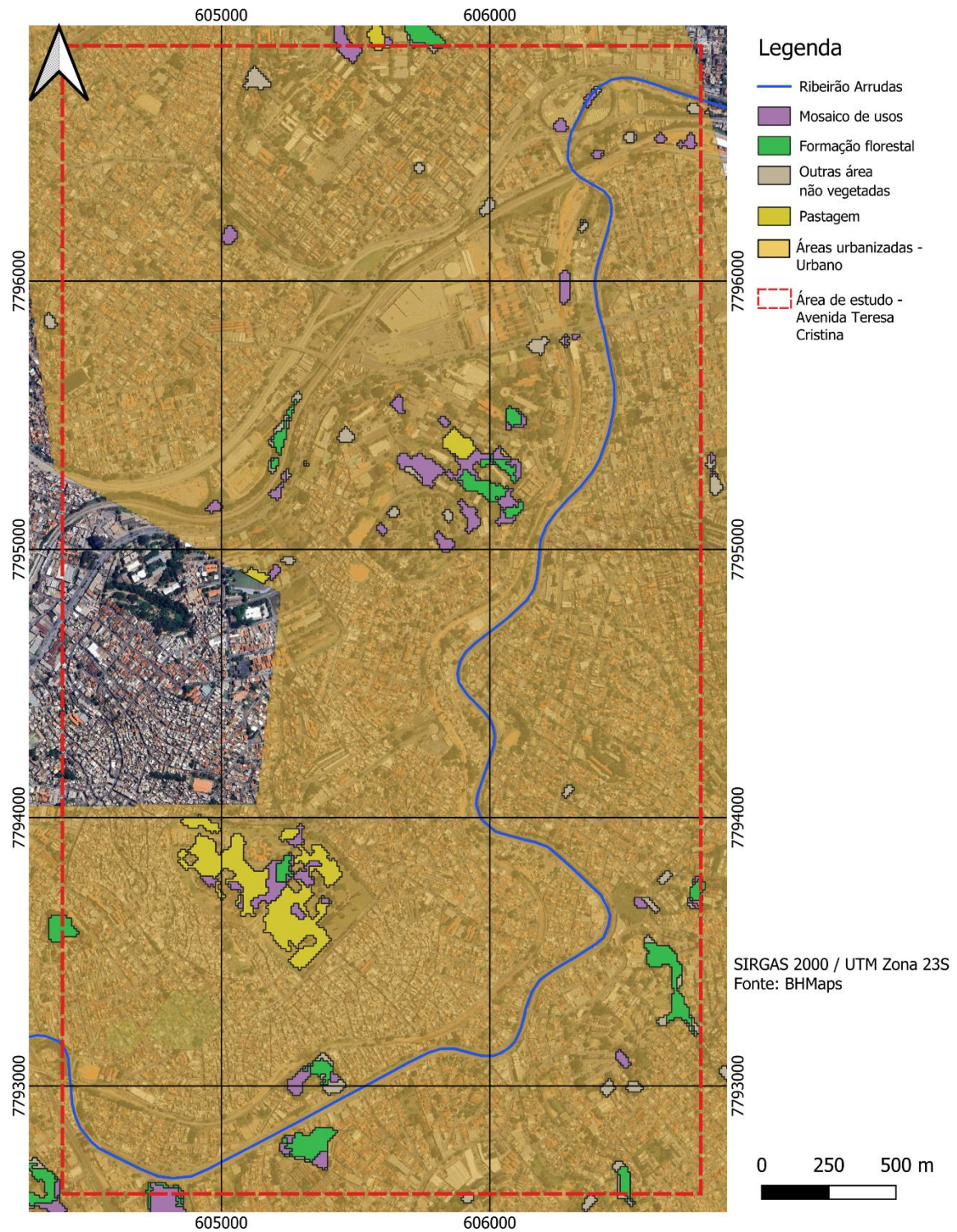
Posteriormente, foi definido o coeficiente de Manning, parâmetro essencial para representar a rugosidade do canal e da planície de inundação, com base em referências do HEC-RAS, conforme orientações presentes nos manuais do U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 2025). Inicialmente, foram adotados valores genéricos da literatura, possibilitando a obtenção de uma primeira estimativa da mancha de inundação. Em seguida, a partir do cruzamento entre o *shapefile* do *Merge* e o recorte do *raster* do MapBiomias no QGIS (QGIS, 2023), foi possível extrair a tabela de atributos de uso e ocupação do solo, permitindo a atribuição diferenciada de coeficientes de *Manning* de acordo com as classes de cobertura com base nos valores dos códigos das classes da legenda da Coleção 9 (MapBiomias Brasil, 2024).

Para esse ajuste, segundo Araújo (2025) foram consultadas referências clássicas que subsidiaram a definição dos coeficientes de *Manning* conforme o tipo de cobertura do solo, possibilitando simulações mais aderentes à realidade local e à heterogeneidade da superfície de escoamento. Assim, para formações florestais e savânicas foram considerados os valores de Engman (1986) e Arcement & Schneider (1989); para pastagens e campos agrícolas, Chow (1959) e Engman (1986); para áreas urbanizadas, Chow (1959) e Arcement & Schneider (1989); e, por fim, para rios, lagos e oceanos, Barnes (1967) e Coon (1998). Após este processo de calibração do modelo hidrodinâmico, foi realizado a simulação novamente para obtenção dos resultados com o mapa das manchas de inundação.

A figura 55 apresenta o recorte da área de estudo ao longo da Avenida Teresa Cristina, acompanhando o traçado do Ribeirão Arrudas, o que evidencia a predominância das classes de uso e cobertura da terra mapeadas a partir da Coleção 9 do MapBiomias Brasil (Mapbiomas, 2024). Na legenda, destacam-se as classes de áreas urbanizadas, formações florestais, pastagens, mosaicos de usos e outras áreas não vegetadas, distribuídas de maneira fragmentada em um contexto fortemente urbanizado.

Essa classificação dialoga diretamente com a atribuição de coeficientes de rugosidade de Manning, uma vez que diferentes autores estabelecem valores específicos de acordo com o tipo de cobertura superficial. No contexto específico da área analisada, a adoção do coeficiente de Manning correspondente às áreas urbanizadas justifica-se pelo predomínio dessa classe de uso e cobertura da terra, a qual exerce influência direta e significativa sobre o comportamento hidráulico do Ribeirão Arrudas.

Figura 55 – Uso e cobertura da terra no trecho do Ribeirão Arrudas – Área de estudo da Avenida Teresa Cristina, com base na Coleção 9 do MapBiomas Brasil (Mapbiomas, 2024)



Fonte: Autora, 2026.

A análise da mancha de inundação apresentada na figura 56, evidencia a propagação do fluxo ao longo do leito do Ribeirão Arrudas, estendendo-se de forma significativa para as áreas adjacentes à Avenida Teresa Cristina. Observa-se que, em diversos trechos, a mancha transborda os limites imediatos do canal, alcançando zonas urbanizadas densamente ocupadas, demonstrando a vulnerabilidade da região frente a eventos de cheia.

A configuração topográfica e a elevada impermeabilização do entorno intensificam a expansão da inundação, ampliando o impacto sobre vias, edificações e infraestruturas. Esses resultados demonstram a relevância da modelagem hidrodinâmica para compreender os padrões de escoamento e subsidiar medidas de mitigação e planejamento urbano mais resilientes.

Figura 56 - Mapa da mancha de inundação realizada com o MDE *Sentinel-2*

Fonte: Autora, 2026.

Após a análise inicial realizada com o MDE Sentinel-2, tornou-se necessário avançar para as simulações hidrodinâmicas utilizando o MDT Prodabel ((Belo Horizonte; Prodabel, 2026), que apresenta maior detalhamento altimétrico e melhor adaptação ao contexto urbano de Belo Horizonte. Esse modelo fornece subsídios para representar a caracterização do terreno e do canal, permitindo aprimorar a calibração e a confiabilidade dos resultados. Essa permite comparar o desempenho das diferentes bases de dados e avaliar de forma mais acurada os processos de inundação e escoamento no trecho do Ribeirão Arrudas.

5.4 Simulações Hidrodinâmicas no *HEC-RAS* com uso de MDT Prodabel

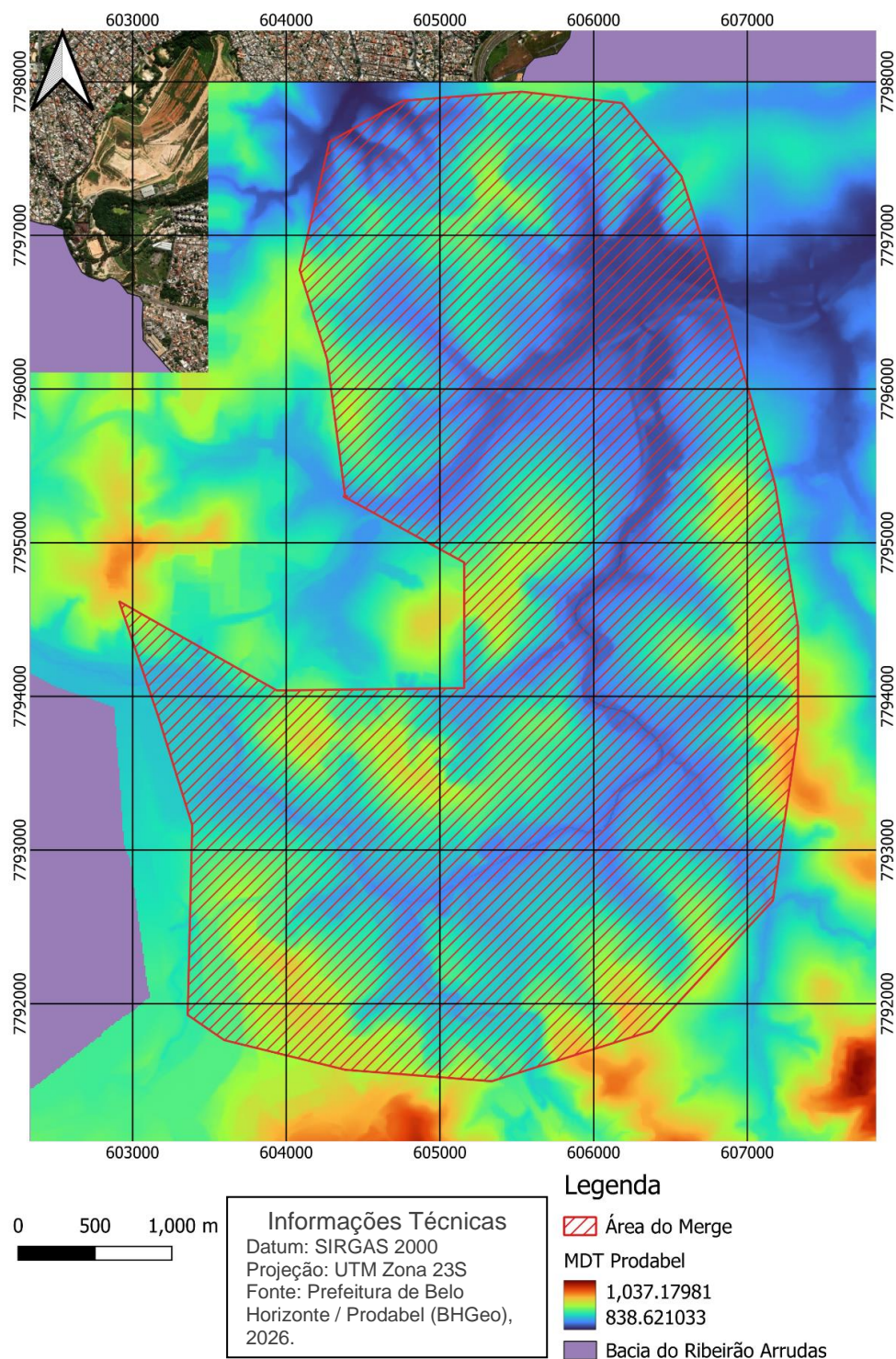
As simulações hidrodinâmicas realizadas a partir do MDT Prodabel (Belo Horizonte; Prodabel, 2026) oferecem a oportunidade de explorar, com maior detalhamento, as condições do relevo urbano e da calha do Ribeirão Arrudas, uma vez que esse modelo digital foi desenvolvido especificamente para o território de Belo Horizonte. A utilização dessa base permite capturar variações topográficas fundamentais para a análise de áreas densamente urbanizadas e suscetíveis a inundações. Assim, a aplicação do MDT Prodabel no *HEC-RAS* (USACE, 2025) contribui para aprimorar a representação espacial da área de estudo e fornecer resultados consistentes para a avaliação hidrodinâmica no trecho.

O MDT Prodabel (Belo Horizonte; Prodabel, 2026) foi elaborado a partir da obtenção dos arquivos em formato xyz disponibilizados pela Prefeitura de Belo Horizonte, correspondentes à área delimitada das microbacias do Ribeirão Arrudas. Esses arquivos foram processados no QGIS (QGIS, 2023), convertendo-se os dados em nuvens de pontos contendo latitude, longitude e cota altimétrica. A partir dessa nuvem, foram gerados *rasters* individuais para cada quadrante fornecido, os quais foram posteriormente integrados em um mosaico contínuo no formato tif, constituindo o Modelo Digital do Terreno utilizado nas simulações (figura 57).

No *HEC-RAS* (USACE, 2025), o MDT foi inserido no módulo *RAS Mapper*, onde foi construída a geometria do modelo. Nessa etapa, aplicou-se a ferramenta *Merge* para delimitar a área de simulação e estabelecer os limites de montante (*BC Line Up*) e jusante (*BC Line Down*). Essa configuração espacial é fundamental para definir o domínio hidráulico e garantir que o modelo represente adequadamente o

comportamento do escoamento no trecho de estudo.

Figura 57 - Modelo digital do Terreno (MDT) com área do *Merge* inserida nas Bacias do Ribeirão Arrudas



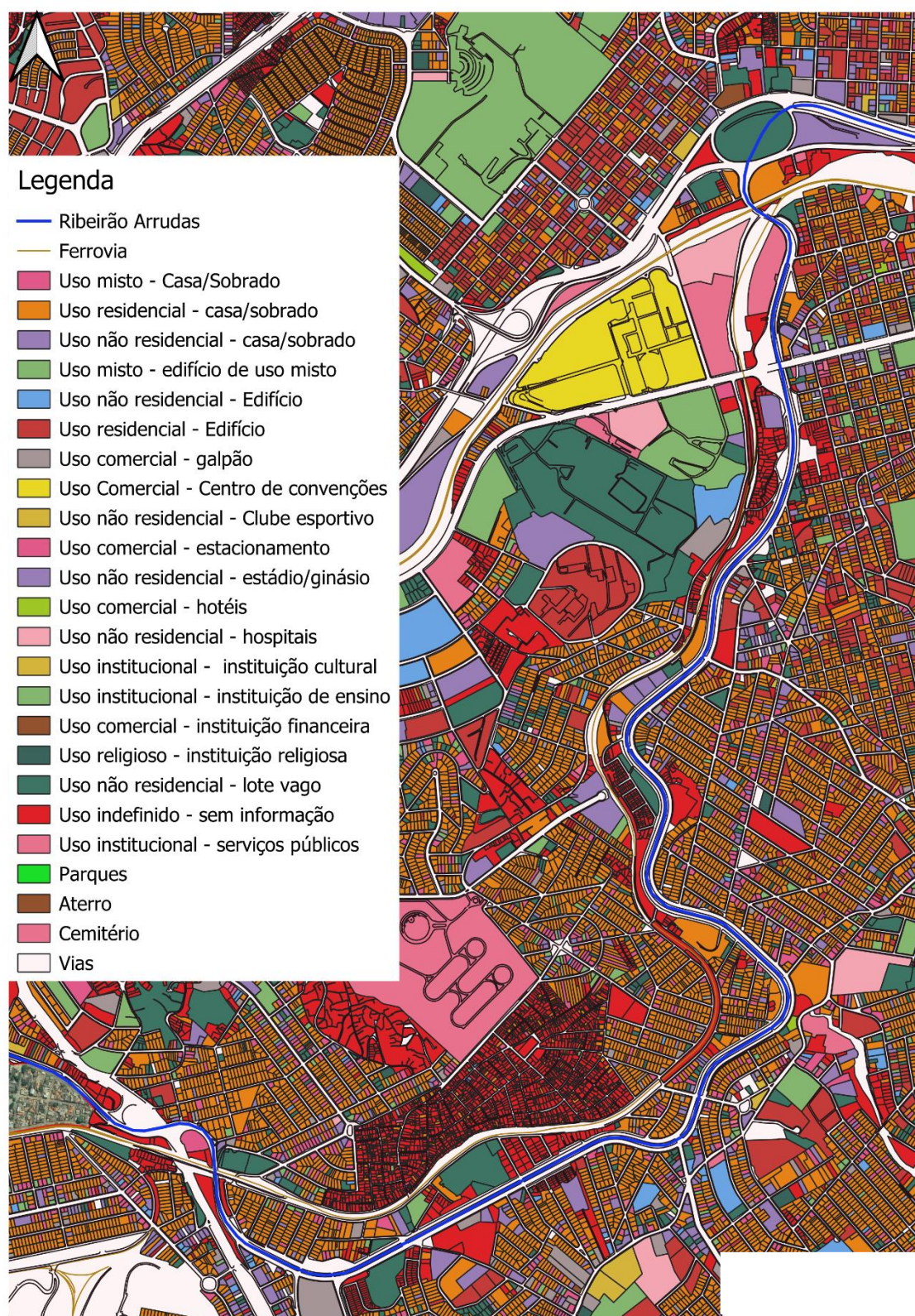
Fonte: PBH modificado pela autora, 2026.

A inserção dos dados foi realizada por meio da inclusão das séries hidrológicas no

Flow Hydrograph, complementadas pela definição da condição de contorno de declividade no *Normal Depth*. As vazões adotadas serão as mesmas utilizadas nas simulações do MDT *Sentinel* obtidas a partir da estação fluviométrica 41200430 – Raposos. Quanto ao dado de entrada de declividade (*normal depth*) foi utilizada também a mesma declividade média da simulação anterior.

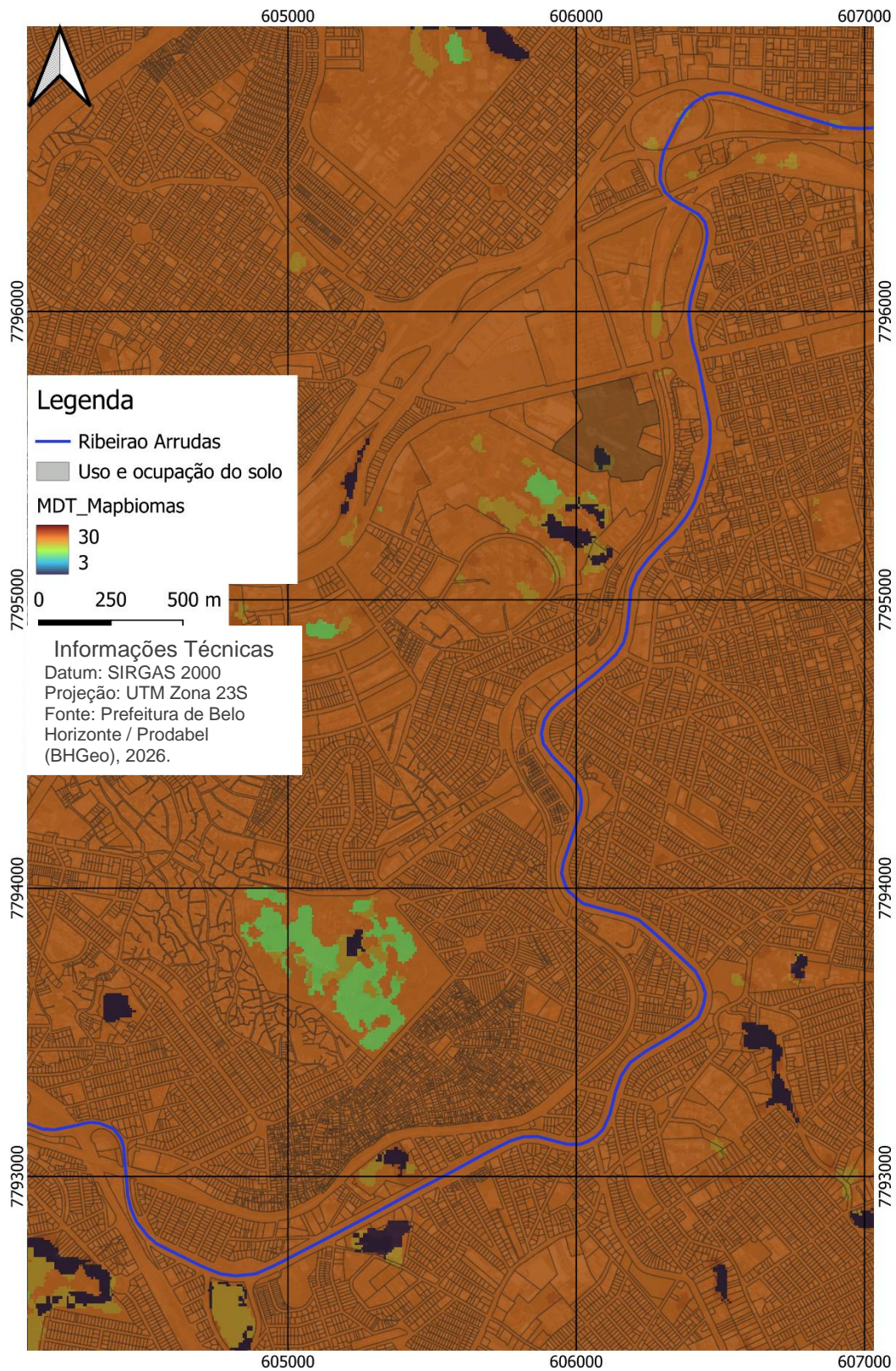
A calibração final das simulações hidrodinâmicas envolveu a definição do coeficiente de Manning, parâmetro essencial para representar a rugosidade do canal e das margens. Diferentemente do procedimento adotado com o MDE *Sentinel-2*, nesta etapa o recorte foi realizado a partir do mapa de uso e ocupação do solo disponibilizado pelo *BHMaps*, associado à interseção com o *raster* do *MapBiomas* conforme figuras 58 e 59, respectivamente.

Figura 58 - Mapa de uso e ocupação do solo



Fonte: PBH modificado pela autora, 2026.

Figura 59 - Interseção do *raster* do MapBiomás (2024) com o mapa de uso e ocupação do solo

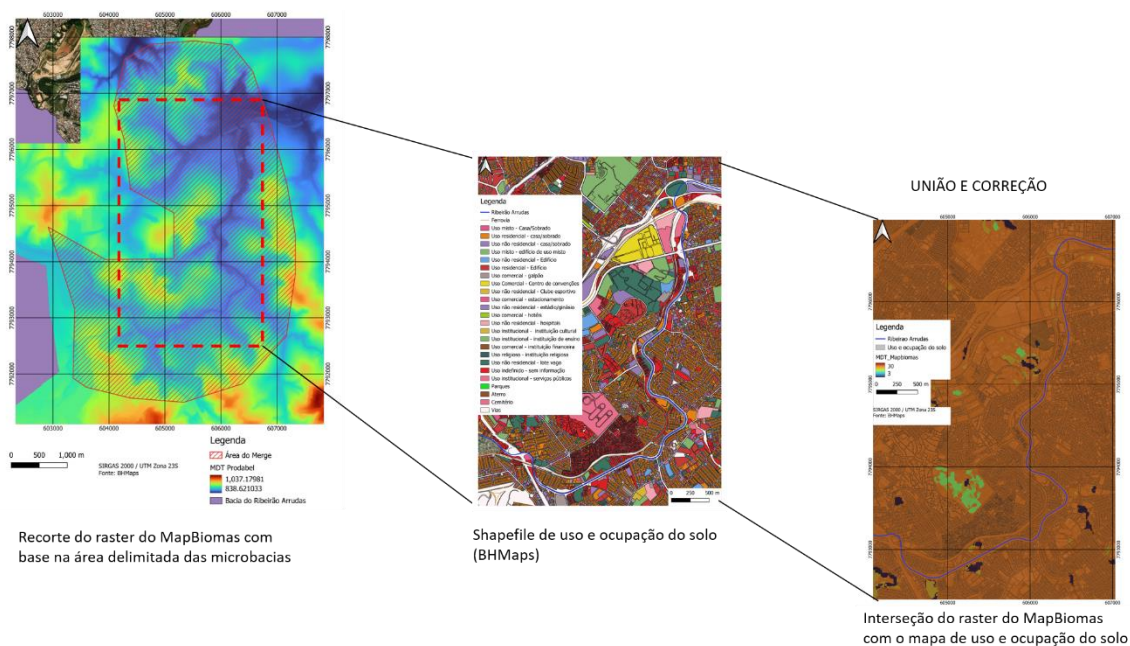


Fonte: PBH modificado pela autora, 2026.

Inicialmente, no ambiente do QGIS (QGIS, 2023), realizou-se o recorte do raster do MapBiomias (2024) a partir dos limites das microbacias previamente delimitadas, garantindo que a análise se restringisse ao recorte hidrográfico de interesse. Em paralelo, essa mesma área foi extraída do shapefile de uso e ocupação do solo disponibilizado pelo BHMaps (Belo Horizonte; Prodabel, 2026) e, posteriormente, confrontada com o shapefile do perímetro urbano de Belo Horizonte.

Essa etapa mostrou-se fundamental para unir o produto do MapBiomias (2024), sobretudo em áreas densamente urbanizadas, com a complexidade do uso e ocupação do solo com a classificação automática. A sobreposição dessas camadas, representada na figura 60, evidencia o ajuste progressivo entre os limites hidrográficos, o perímetro urbano e as classes de uso do solo, reforçando a leitura integrada da paisagem urbana analisada.

Figura 60 – Esquema de sobreposição de camadas para o desenvolvimento da simulação



Fonte: Autora, 2026.

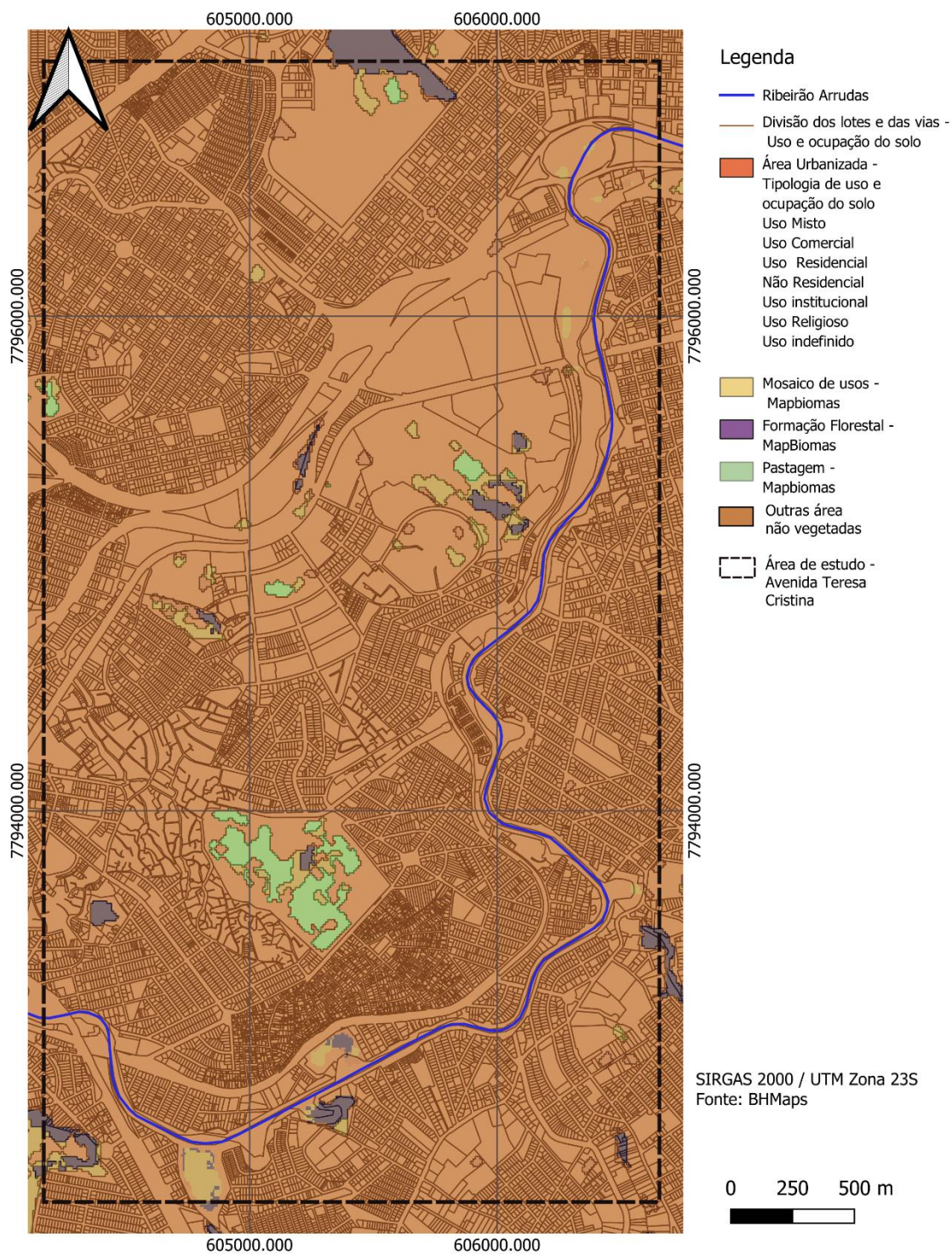
A partir da consolidação dessas informações, os arquivos vetoriais foram integrados em uma base única e contínua, permitindo a interseção entre as classes de uso e ocupação do solo e as categorias de cobertura definidas pelo MapBiomias (2024). Essa integração possibilitou não apenas a compatibilização das legendas, mas também uma leitura das relações entre a estrutura urbana e os elementos naturais

da paisagem, aspecto central nas análises hidrológicas e hidráulicas propostas ao longo do trabalho. A junção das tabelas de atributos viabilizou a associação direta entre cada classe mapeada e os respectivos valores do coeficiente de Manning, selecionados conforme a literatura especializada discutida anteriormente. Por fim, a conversão do arquivo resultante para o formato raster (tif) permitiu sua incorporação ao modelo *HEC-RAS* (USACE, 2025), assegurando que a simulação refletisse, de forma consistente, as condições reais de uso e cobertura da terra no entorno do Ribeirão Arrudas, especialmente no trecho urbano fortemente impermeabilizado.

O cruzamento do mapa de uso e ocupação do solo com o *shapefile* do Merge possibilitou a extração da tabela de atributos e a atribuição de coeficientes de Manning diferenciados conforme as classes de cobertura identificadas (figura 61). A figura apresenta a sobreposição do uso e ocupação do solo, conforme a base do BHMaps (Belo Horizonte; Prodabel, 2026) integrada às classes do MapBiomias (2024), evidenciando o predomínio de áreas urbanizadas ao longo do Ribeirão Arrudas no trecho da Avenida Teresa Cristina e permitindo a diferenciação espacial das classes utilizadas para a atribuição dos coeficientes de Manning. Essa etapa permitiu representar de forma mais precisa as variações de rugosidade da superfície, considerando as especificidades de cada tipo presente na área de estudo.

De acordo com Araújo (2025), a definição desses valores baseou-se em referências consolidadas, como Chow (1959), Engman (1986), Arcement e Schneider (1989), Barnes (1967) e Coon (1998), assegurando maior coerência entre os parâmetros adotados e as condições reais de escoamento observadas. Com base no mapa de uso e ocupação do solo (figura 60), os tipos foram correlacionados às classes de cobertura do MapBiomias, estruturadas em forma de tabela para facilitar a organização e a aplicação dos coeficientes no modelo hidrodinâmico (Tabela 1).

Figura 61 - Uso e cobertura da terra com base na Coleção 9 do MapBiomas Brasil e o uso e ocupação do solo BHMmaps relacionados as classes da tabela 1



Fonte: Autora, 2026.

Tabela 1 - Coeficientes de manning correlacionados as classes de cobertura do Mapbiomas e as tipologias de uso e ocupação do solo.

| Autores | | PBH | |
|---------------------|---------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Classe | Manning | Tipologia de Uso e Ocupação do solo | Manning (com base nos autores) |
| Formação Florestal | 0.08 | Uso Misto | 0.1 |
| Formação Savânica | 0.06 | Uso Residencial | 0.1 |
| Silvicultura | 0.04 | Uso Comercial | 0.1 |
| Campo Alagado | 0.1 | Não Residencial | 0.1 |
| Formação Campestre | 0.05 | Uso institucional | 0.1 |
| Pastagem | 0.04 | Uso Religioso | 0.1 |
| Lavoura Temporária | 0.035 | Uso indefinido | 0.1 |
| Mosaico de Usos | 0.07 | Áreas Verdes | 0.08 |
| Área Urbanizada | 0.1 | Vias | 0.1 |
| Áreas não Vegetadas | 0.04 | | |
| Afloramento Rochoso | 0.045 | | |
| Mineração | 0.055 | | |
| Aquicultura | 0.025 | | |
| Rio, Lago e Oceano | 0.025 | | |
| Lavoura Perene | 0.035 | | |

Fonte: Chow (1959), Engman (1986), Arcement e Schneider (1989), Barnes (1967) e Coon (1998), Araújo (2025) adaptado pela autora, 2026.

A análise integrada da tabela de coeficientes de Manning e do mapa de uso e ocupação do solo evidencia como a estrutura da paisagem urbana influencia diretamente a dinâmica hidrológica do Ribeirão Arrudas. Observa-se que as classes predominantes na área de estudo associadas aos usos urbanos residenciais,

comerciais, institucionais e às vias apresentam coeficientes de Manning elevados (em torno de 0,10), refletindo superfícies impermeáveis, baixa capacidade de infiltração e maior velocidade do escoamento superficial. Em contraste, áreas com cobertura vegetal mais significativa, como formações florestais, áreas verdes e mosaicos de usos com presença de vegetação, apresentam coeficientes inferiores, indicando maior rugosidade superficial e maior potencial de retenção e dissipação da energia do escoamento.

Essa diferenciação reforça a leitura de que o padrão histórico de ocupação urbana, marcado pela supressão da vegetação e pela canalização dos cursos d'água, compromete a capacidade de absorção do solo e intensifica os processos de cheias. Assim, a espacialização dos coeficientes de Manning não apenas subsidia a modelagem hidráulica, mas também explicita, em escala local, a relação direta entre forma urbana, uso do solo e desempenho hidrológico da paisagem, apontando a necessidade de estratégias urbanísticas que reintroduzam infraestrutura verde e superfícies permeáveis como elementos estruturadores da resiliência urbana.

A simulação hidrodinâmica realizada a partir do MDT Prodabel (figura 62) evidencia a propagação significativa da mancha de inundação ao longo do trecho em estudo do Ribeirão Arrudas, nas margens da Avenida Teresa Cristina. Observa-se que as áreas mais afetadas correspondem aos segmentos de canal aberto e às adjacências urbanizadas, especialmente no trecho compreendido entre a Avenida Presidente Juscelino Kubitschek e a Rua Magi Salomon, com cruzamento pela Avenida Amazonas, no bairro Gameleira. Outro ponto crítico foi identificado no segmento entre a Avenida Presidente Juscelino Kubitschek e a Avenida Ressaca, incluindo as ruas Humaitá e Vereador Geraldo Pereira, no bairro Padre Eustáquio, onde a proximidade das edificações, a baixa declividade local e a elevada impermeabilização do solo favorecem o acúmulo e o transbordamento das águas.

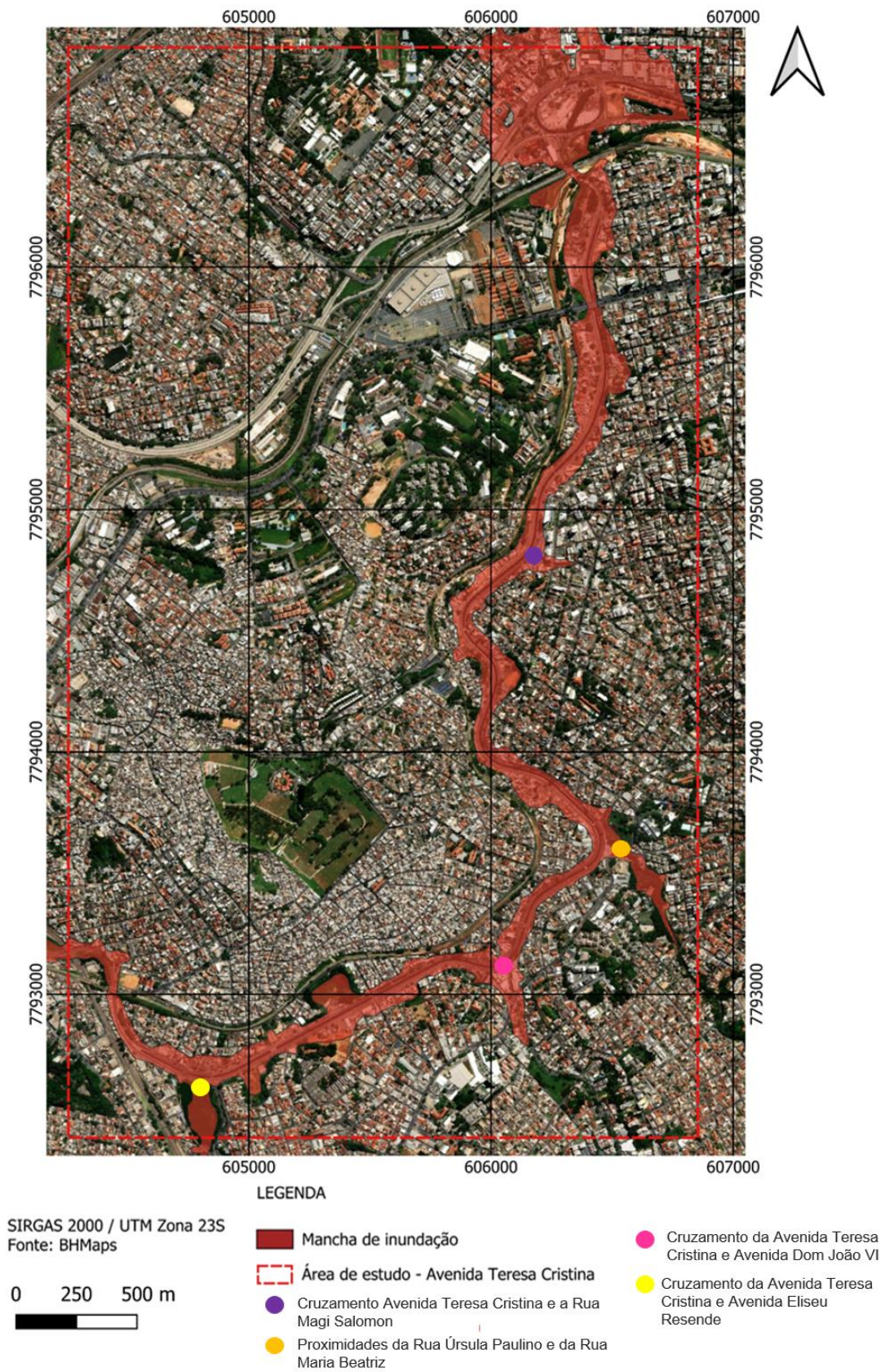
Observa-se que, nas áreas mais afetadas pela mancha de inundação, há predominância de edificações de uso misto, com a presença de galpões, edifícios residenciais, comerciais e institucionais, além de casas térreas unifamiliares, especialmente no bairro Padre Eustáquio. As áreas mais críticas ao longo da Avenida Teresa Cristina, no bairro Gameleira, apresentam uma configuração de uso caracterizada por elevada concentração de galpões, equipamentos de lazer como

praças e quadras, edifícios residenciais e de usos institucionais, a exemplo a sede do DER-MG (Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais), e também unidades residências de um pavimento unifamiliares.

Na figura 62, percebe-se que a mancha de inundação apresenta ampla extensão lateral em determinados pontos demarcados no mapa, especialmente nas regiões próximas aos cruzamentos viários entre a Avenida Teresa Cristina e a Rua Magi Salomon (ponto roxo), no bairro Salgado Filho; nas proximidades da Rua Úrsula Paulino e da Rua Maria Beatriz (ponto laranja), no bairro Havaí; e nas avenidas Dom João VI (ponto rosa) e Eliseu Resende (ponto amarelo), no bairro Betânia. Esses trechos coincidem com a confluência de importantes córregos afluentes ao ribeirão, como os córregos: da Rua Magi Salomon, o Cercadinho, o Dom João VI e o Bonsucesso, configurando zonas críticas de extravasamento. Esses resultados reforçam a vulnerabilidade da infraestrutura urbana instalada ao longo das margens do Arrudas e evidenciam a importância da incorporação de parâmetros topográficos de alta resolução, como os fornecidos pelo MDT Prodabel, para uma análise mais precisa dos processos de inundação em ambiente urbano.

Na Figura 63 apresenta-se a área suscetível à inundação, com base nos dados oficiais da Carta de Inundações disponibilizada pela Prefeitura de Belo Horizonte (2023), representada em amarelo, em comparação com a mancha de inundação obtida por meio das simulações realizadas neste estudo, representada em laranja. A partir dessa comparação, observa-se que a mancha simulada apresenta maior abrangência espacial, indicando uma extensão ampliada das áreas potencialmente sujeitas à inundação ao longo do canal. Entretanto, na porção superior do mapa, verifica-se a sobreposição entre as duas manchas, o que reforça a consistência do modelo adotado e confirma essa área como um trecho crítico, já identificado empiricamente como suscetível a eventos de inundação.

Figura 62 - Mapa da mancha de inundação realizada com o MDT Prodebel



Fonte: Autora, 2026.

Figura 63 - Mapa de comparação entre as manchas de inundação realizada com o MDT Prodabel e pela Carta de inundações da PBH



Fonte: Carta de inundações da Prefeitura de Belo Horizonte, 2023; *HEC-RAS* (USACE, 2025) modificado pela autora 2025.

Diante desse diagnóstico, o presente estudo fornece subsídios técnicos e espaciais capazes de orientar intervenções prioritárias nas áreas mais críticas identificadas, objetivando contribuir para a formulação de estratégias alinhadas ao conceito de cidade esponja. A delimitação precisa das manchas de inundação, associada à leitura integrada do uso e ocupação do solo, da topografia e da dinâmica hidrológica, permite direcionar ações de requalificação urbana e infraestrutura verde com maior efetividade, especialmente nos trechos onde o extravasamento recorrente compromete a segurança, a mobilidade e a qualidade ambiental.

Os resultados obtidos ampliam a compreensão dos processos hidrológicos urbanos associados ao Ribeirão Arrudas e constituem um suporte técnico consistente para a proposição de estratégias fundamentadas em soluções baseadas na natureza. Ao evidenciar a necessidade de ampliar a capacidade de retenção, infiltração e desaceleração das águas pluviais, o estudo contribui para o fortalecimento da resiliência urbana e orienta a formulação de intervenções estruturantes alinhadas aos princípios do projeto de cidade esponja.

A comparação entre as modelagens realizadas com o MDE Sentinel-2 e o MDT Prodabel evidencia diferenças significativas tanto na resolução dos dados quanto na precisão dos resultados obtidos. Enquanto o Sentinel-2, com resolução espacial de 10 metros, apresentou desempenho satisfatório para a compreensão geral do comportamento hidrológico da bacia, o MDT Prodabel, derivado de dados altimétricos locais de maior detalhamento, possibilitou uma representação topográfica mais refinada do relevo urbano e do canal do Ribeirão Arrudas.

Antes de avançar para as análises subsequentes, é importante destacar que as simulações realizadas neste estudo possuem caráter exploratório e metodológico, sendo utilizadas como instrumento de compreensão das dinâmicas hidrológicas no contexto urbano analisado. Embora apresentem limitações inerentes à disponibilidade e à resolução dos dados de entrada, os resultados obtidos são consistentes para fins comparativos e de avaliação de cenários. Ressalta-se, contudo, que a confiabilidade e a precisão das simulações hidrodinâmicas estão diretamente relacionadas à qualidade dos dados utilizados, especialmente no que se refere ao Modelo Digital de Terreno (MDT), preferencialmente obtido por tecnologias de alta resolução, como o levantamento a laser (LiDAR), bem como à adequada

definição dos parâmetros hidráulicos, em particular o coeficiente de rugosidade de Manning. A correta parametrização desses elementos é fundamental para a representação do comportamento do escoamento nos resultados apresentados.

Essa precisão refletiu-se em simulações da propagação das manchas de inundação e na identificação de áreas críticas com maior acurácia. Além disso, o uso combinado de bases distintas reforçou a importância da integração entre dados orbitais e municipais para análises hidrodinâmicas em áreas densamente urbanizadas. Encerrando este capítulo, destaca-se que a aplicação comparativa dos dois métodos forneceu subsídios técnicos essenciais para o desenvolvimento das propostas e discussões apresentadas no próximo capítulo. A simulação e o mapeamento para a implementação de medidas de cidade esponja, com infraestrutura verde ao longo do Ribeirão Arrudas no trecho estudado serão analisados no tópico seguinte.

6 PROPOSTAS E DISCUSSÕES

6.1 Mapeamento para Implementação de medidas de Infraestrutura Verde

O mapeamento para implementação de medidas de Infraestrutura Verde nesta etapa tem como objetivo propor soluções baseadas na natureza capazes de mitigar os impactos das inundações ao longo do Ribeirão Arrudas. No trecho correspondente à Avenida Teresa Cristina é caracterizada por ser uma área historicamente marcada por recorrentes alagamentos e por densas ocupações urbanas. A partir dos resultados obtidos nas simulações hidrodinâmicas com o *HEC-RAS* (USACE, 2025), foi possível identificar as áreas mais suscetíveis à inundação. A proposta é a transformação na paisagem urbana por meio da conversão das faixas marginais do canal, correspondentes à mancha de inundação, em áreas totalmente permeáveis propondo uma transformação na paisagem e na estrutura urbana.

Essa proposta considera a inserção de parques alagáveis, jardins de chuva, pavimentos drenantes e faixas vegetadas multifuncionais, compondo um sistema contínuo de retenção e infiltração das águas pluviais. Dessa forma, o mapeamento torna-se uma ferramenta essencial para avaliar o potencial de resiliência hídrica da bacia. Esta abordagem demonstra como o redesenho da paisagem urbana pode contribuir para a redução dos riscos de inundação e para a requalificação ecológica do ribeirão.

Para a simulação das medidas de uma Cidade Esponja, foi utilizado o Modelo Digital do Terreno (MDT) da Prodabel, que possibilitou representar com melhor precisão a topografia e o comportamento hidrodinâmico da área. O cenário considerou uma planície inundável revegetada com arbustos e árvores, caracterizada por alta resistência ao escoamento e elevada capacidade de amortecimento das cheias. Essa modelagem permitiu avaliar o potencial dessas intervenções na redução da propagação da mancha de inundação e na promoção de maior resiliência hídrica para o trecho urbano analisado.

Para o mapeamento foram utilizados os dados apresentados na tabela 2 para a simulação de um cenário provido de infraestrutura verde com soluções baseadas na natureza atreladas ao conceito de cidade esponja. A tabela 2 apresenta os valores de coeficiente de *Manning* (n) adotados para os diferentes tipos de infraestrutura

verde propostas na área de estudo, com destaque para o parque alagável planejado nas margens do Ribeirão Arrudas.

Esses parâmetros foram definidos com base em referências consagradas na literatura hidráulica e hidrológica (Chow, 1959; Barnes, 1967; Engman, 1986; Arcement & Schneider, 1989), considerando as características físicas e funcionais de cada superfície. No caso do parque alagável, foi utilizado o valor de $n = 0,08$, representando uma condição de rugosidade extremamente elevada, associada à presença de vegetação densa, gramíneas, arbustos e pequenas depressões topográficas que retardam o escoamento superficial e favorecem a infiltração da água no solo. Esse valor expressa o comportamento hidráulico esperado de uma área totalmente permeável e projetada para o amortecimento de cheias, funcionando como uma zona de retenção natural ao longo do canal.

Tabela 2 - Valores sugeridos de coeficiente de Manning (n) com base na literatura

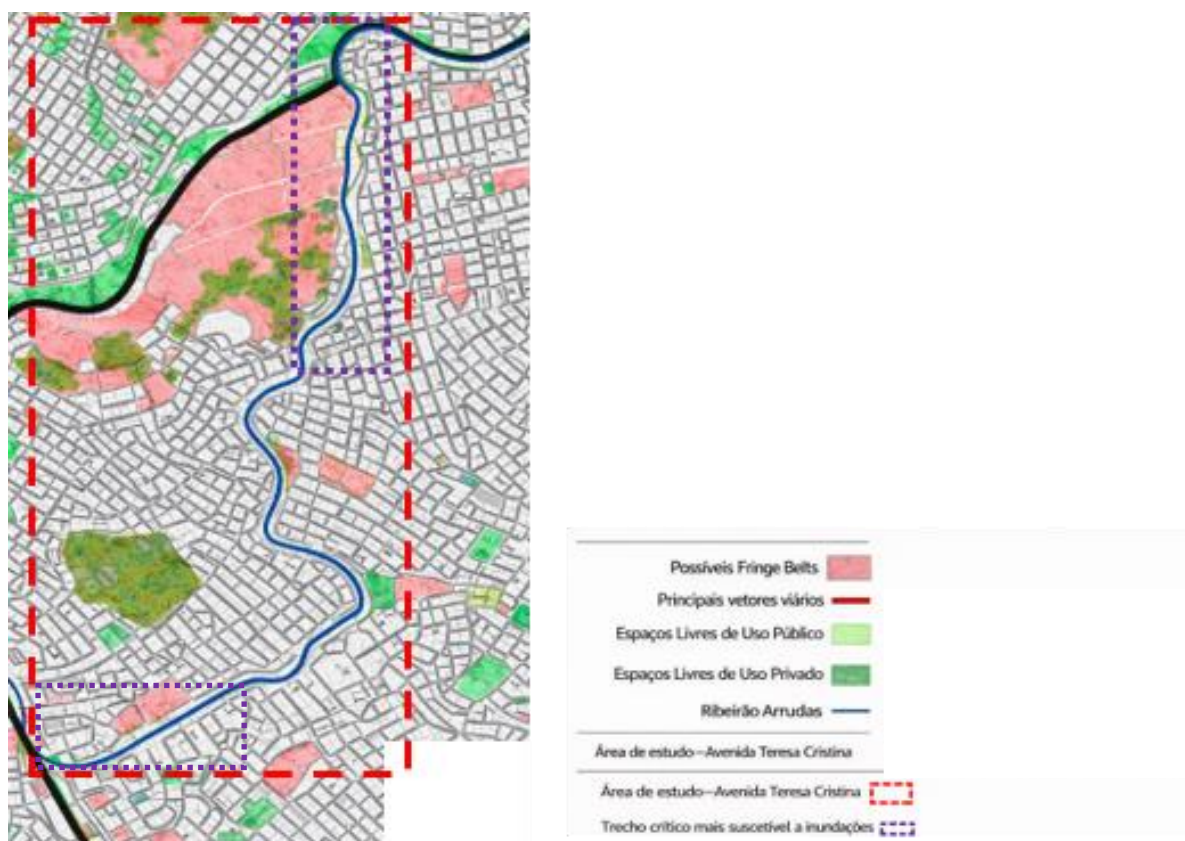
| Classe / Tipologia | Valor adotado (n) | Intervalo recomendado | Justificativa resumida / uso prático |
|---|-------------------|---|---|
| Jardim de chuva | 0,06 | 0,04 – 0,10 | Vegetação herbácea densa sobre substrato permeável; rugosidade moderada. Referências: Engman (1986); Arcement & Schneider (1989). |
| Parque alagável (margem totalmente permeável) | 0,08 | 0,08 – 0,16 (até 0,20 se vegetação muito densa) | Planície inundável revegetada com arbustos/árvores; alta resistência ao escoamento e boa capacidade de amortecimento. Referências: Barnes (1967); Engman (1986). |
| Pavimento permeável | 0,015 | 0,010 – 0,030 | Superfície com escoamento superficial relativamente regular; rugosidade baixa–média dependendo das juntas/obstruções. Referências: Chow (1959); Arcement & Schneider (1989). |
| Floresta alagável / ripária | 0,12 | 0,08 – 0,20 | Vegetação arbórea com troncos, raízes e sub-bosque; elevada rugosidade e forte dissipação de energia. Referências: Barnes (1967); Engman (1986); Arcement & Schneider (1989). |

Fonte: Araújo (2025), Chow (1959), Engman (1986), Arcement e Schneider (1989), Barnes (1967) e Coon (1998) adaptado pela autora, 2026.

As áreas destinadas à implantação do parque alagável foram estrategicamente delimitadas ao longo das margens do Ribeirão Arrudas, com base na análise da paisagem urbana. Essa definição considerou o mapeamento das áreas classificadas como *fringe belts*, caracterizadas por grandes parcelas do território com baixa intensidade de ocupação e presença de equipamentos urbanos ou áreas verdes. Na Figura 64, apresenta-se a ampliação do mapa de possíveis *fringe belts* e espaços livres do município, com ênfase na delimitação da área de estudo.

É importante observar que, nas proximidades das margens do ribeirão, identifica-se uma extensa área classificada como possíveis *fringe belts* (em rosa), especialmente próximos aos trechos críticos mais suscetíveis a inundações, conforme indicado pelas simulações apresentadas no capítulo anterior. A convergência dessas informações, o mapeamento de áreas de baixa intensidade de ocupação e de espaços livres, associado às manchas de inundação reforça e justifica a implantação do parque alagável como estratégia de intervenção urbana ao planejamento urbano.

Figura 64 – Possíveis *Fringe Belts* ampliado na área do projeto de parque alagável



Fonte: Autora 2026, adaptado de Laboratório da Paisagem EA UFMG, 2009.

Na Figura 65, são apresentadas, de forma ampliada, as áreas classificadas segundo a distribuição dos espaços livres intraquadra, organizadas de acordo com os diferentes percentuais de área livre em relação à ocupação edificada. No trecho de estudo, nas adjacências do Ribeirão Arrudas, predominam quadras com até 30% de espaços livres intraquadra, evidenciando um padrão de ocupação denso e altamente impermeabilizado. As quadras com percentuais intermediários, entre 30% e 50%, ocorrem de maneira pontual, enquanto aquelas com mais de 50% de espaços livres (em amarelo) geralmente associadas a grandes equipamentos urbanos, áreas institucionais e vazios urbanos distribuem-se de forma descontínua ao longo do canal.

Sob a perspectiva dos *fringe belts*, observa-se que essas áreas com maiores percentuais de espaços livres intraquadra localizam-se próximas aos trechos mais críticos e suscetíveis a inundações, conforme indicado pelos mapas e análises apresentados no capítulo anterior. Essa sobreposição de informações reforça a pertinência da adoção de estratégias alinhadas ao conceito de cidade esponja, como a implantação do parque alagável e das intervenções propostas, incluindo pavimentos permeáveis e jardins de chuva. Nesse contexto, os jardins de chuva destacam-se como soluções particularmente adequadas para os espaços livres intraquadra, em função de suas características de implantação flexível e de sua compatibilidade com experiências já implementadas no município.

Figura 65 - Espaços Livres intraquadra ampliado na área do projeto de parque alagável



Fonte: Autora 2026, adaptado de Laboratório da Paisagem, 2008.

O projeto do parque alagável ao longo do Ribeirão Arrudas é apresentado como uma estratégia fundamental de requalificação da paisagem urbana no eixo da Avenida Teresa Cristina. O projeto abrange o trecho compreendido entre a Avenida Presidente Juscelino Kubitschek e as áreas próximas, onde os principais afluentes deságuam no ribeirão até as áreas a montante próximas ao anel rodoviário, conforme indicado na figura 65. A partir de análise das condições do território, o parque é concebido sob o conceito de cidade esponja, incorporando a mancha de inundação não como um problema a ser eliminado, mas como um elemento orientador do projeto de arquitetura paisagística.

Em 2026, as áreas sujeitas a extravasamentos passam a integrar um sistema contínuo de espaços vegetados, vias reconfiguradas e faixas marginais multifuncionais, capazes de absorver, reter e retardar o escoamento das águas pluviais. O traçado viário adjacente é reinterpretado como infraestrutura verde, com potencial para implantação de pavimentos permeáveis, jardins de chuva e corredores arborizados. Sendo assim, os lotes públicos e privados estratégicos são incorporados ao parque como áreas de transição, reforçando a permeabilidade do solo e a continuidade ecológica. A proposta do parque alagável assume o papel de

dispositivo de reconciliação entre a arquitetura da paisagem, o sistema hídrico e o tecido urbano consolidado, articulando drenagem sustentável, qualificação ambiental, espaços de uso público e resiliência climática, ao mesmo tempo em que redefine a relação da cidade com o Ribeirão Arrudas.

A figura 66 apresenta um cenário modelado que considerou uma planície inundável revegetada com arbustos e árvores, configurando um espaço com alta resistência ao escoamento superficial e elevada capacidade de amortecimento das cheias.

Essa reorganização territorial permite o restabelecimento parcial da função ecológica do vale fluvial, contribuindo para o aumento da permeabilidade, a dissipação da energia do escoamento e a redução dos riscos de inundação recorrentes na Avenida Teresa Cristina. A simulação reforça, assim, o papel das infraestruturas verdes como estratégia eficaz de resiliência urbana, promovendo a integração entre drenagem, paisagem e sustentabilidade ambiental no contexto urbano de Belo Horizonte.

Para a etapa de proposição das soluções de Infraestrutura Verde, o mapa da mancha de inundação foi segmentado em dois trechos principais, conforme evidenciado na figura 65. Essa divisão teve o objetivo de aprofundar a análise espacial e adequar as estratégias de intervenção às características morfológicas e hidrológicas específicas de cada setor da área de estudo.

O Trecho 1, vide figura 66, localizado na porção norte, apresenta maior densidade urbana e áreas impermeabilizadas, o que demanda intervenções voltadas à ampliação de superfícies permeáveis e à criação de zonas de amortecimento próximas ao leito do Ribeirão Arrudas. Observa-se a presença de faixas contínuas ao longo do canal, associadas a áreas urbanizadas consolidadas, onde a requalificação das margens e a reorganização do sistema viário permitem a incorporação de infraestruturas verdes de caráter linear.

No Trecho 2, vide figura 66, situado ao sul, abrange áreas com maior disponibilidade de espaços livres e maior potencial para implantação de parques alagáveis e jardins de chuva, favorecendo o restabelecimento da conectividade ecológica e o controle do escoamento superficial. Essa segmentação, portanto, permite a aplicação direcionada das medidas propostas, otimizando os resultados das simulações e o desempenho ambiental das soluções adotadas.

Figura 66 - Mapa da mancha de inundação com área alagável as margens do ribeirão com a segmentação dos trechos



Fonte: HEC-RAS (USACE, 2025) modificado pela autora, 2026.

O Mapa de Manchas para a Implantação das Soluções de Infraestrutura Verde apresenta o delineamento proposto para o Trecho 1 da área de estudo, localizado ao longo do Ribeirão Arrudas (figura 67).

A configuração espacial evidencia a integração entre diferentes tipos de infraestrutura verde, articulados de modo a maximizar a permeabilidade do solo e a capacidade de retenção hídrica da planície fluvial. As áreas de parque alagável foram planejadas nas zonas mais suscetíveis à inundação, atuando como espaços de amortecimento das cheias e de reconexão ecológica com o leito do ribeirão. Essas áreas críticas à inundação coincidem, de forma recorrente, com porções do território caracterizadas por possíveis *fringe belts* e pela presença de espaços livres, o que reforça sua adequação para a implantação de estratégias baseadas na natureza.

Essa lógica dialoga com as contribuições de Forman e Godron (1986) sobre a estrutura da paisagem, ao compreender o sistema proposto como uma rede contínua de corredores associados ao curso d'água, capazes de conectar fragmentos vegetados, áreas livres urbanas e espaços institucionais ao longo do vale. Esses corredores desempenham papel fundamental tanto na condução e dissipação das águas quanto na promoção da conectividade ecológica e da mobilidade ambiental, reforçando a multifuncionalidade do parque alagável como elemento estruturador da paisagem urbana e como suporte à resiliência hidrológica do território.

A definição dos elementos projetuais no trecho de intervenção ao longo do Ribeirão Arrudas resulta de uma leitura integrada, que articula os padrões de uso e ocupação do solo, a dinâmica hidrológica e a disponibilidade de espaços livres identificados nas análises anteriores. Os jardins de chuva foram inseridos prioritariamente nos espaços intraquadra e em áreas mais amplas do tecido urbano, onde há possibilidade de reorganização dos vazios existentes, atuando como dispositivos de infiltração e retenção descentralizada das águas pluviais. Essa estratégia permite interceptar o escoamento superficial antes que ele alcance o sistema de drenagem convencional ou o leito do ribeirão, contribuindo para a redução dos picos de cheia e para a melhoria microclimática desses espaços. O uso de pisos permeáveis foi destinado às áreas de circulação interna do parque, aos percursos de pedestres e

às vias adjacentes, reforçando a permeabilidade do solo em zonas de uso intenso e garantindo continuidade funcional entre o espaço público e a infraestrutura verde proposta.

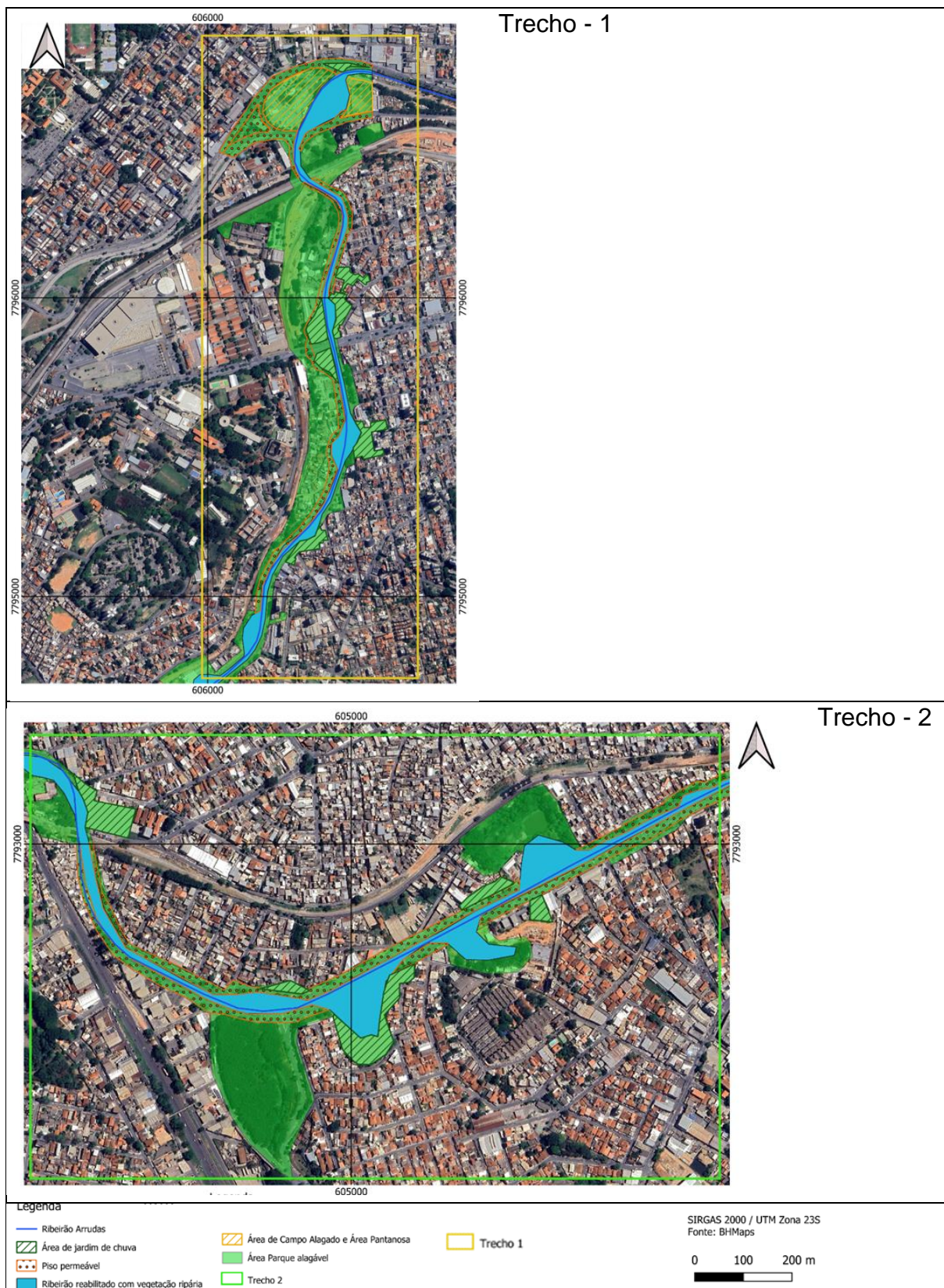
As áreas pantanosas e de campo alagado foram localizadas em porções mais amplas do território, especialmente naquelas identificadas como potenciais *fringe belts* e em grandes espaços públicos ou privados com baixa intensidade de ocupação. Esses ambientes assumem papel estruturante no conceito de parque alagável, funcionando como zonas de acomodação temporária das cheias, de dissipação de energia hidráulica e de ampliação da capacidade de armazenamento hídrico da planície fluvial.

A implantação de vegetação ripária ao longo das margens do Ribeirão Arrudas responde à necessidade de recompor o corredor ecológico do curso d'água, estabilizar taludes, aumentar a rugosidade e qualificar a paisagem urbana, reforçando a relação entre o ribeirão e a cidade. Em conjunto, essas inserções materializam o conceito de cidade esponja ao longo do trecho estudado, integrando soluções baseadas na natureza ao desenho urbano e transformando áreas vulneráveis em uma infraestrutura paisagística resiliente e multifuncional.

O Mapa de Manchas para a Implantação das Soluções de Infraestrutura Verde Trecho 2 apresenta a continuidade das estratégias de requalificação ambiental ao longo do ribeirão (figura 67), com ênfase na ampliação das áreas permeáveis e na restauração ecológica das margens. As áreas de parque alagável foram distribuídas nas zonas de maior suscetibilidade à inundação, funcionando como espaços de retenção e desaceleração do escoamento superficial.

Os jardins de chuva e pisos permeáveis complementam a infraestrutura verde, promovendo infiltração e recarga do lençol freático em áreas urbanas adjacentes. As áreas de campo alagado e pantanoso caracterizam as zonas de transição entre o curso d'água e o tecido urbano, contribuindo para o amortecimento das cheias e a criação de habitats úmidos. O conjunto dessas intervenções propõe uma transformação significativa da paisagem fluvial de forma sustentável.

Figura 67 - Mapeamento da proposta de áreas para a implantação das soluções de infraestrutura verde



Fonte: Autora, 2026.

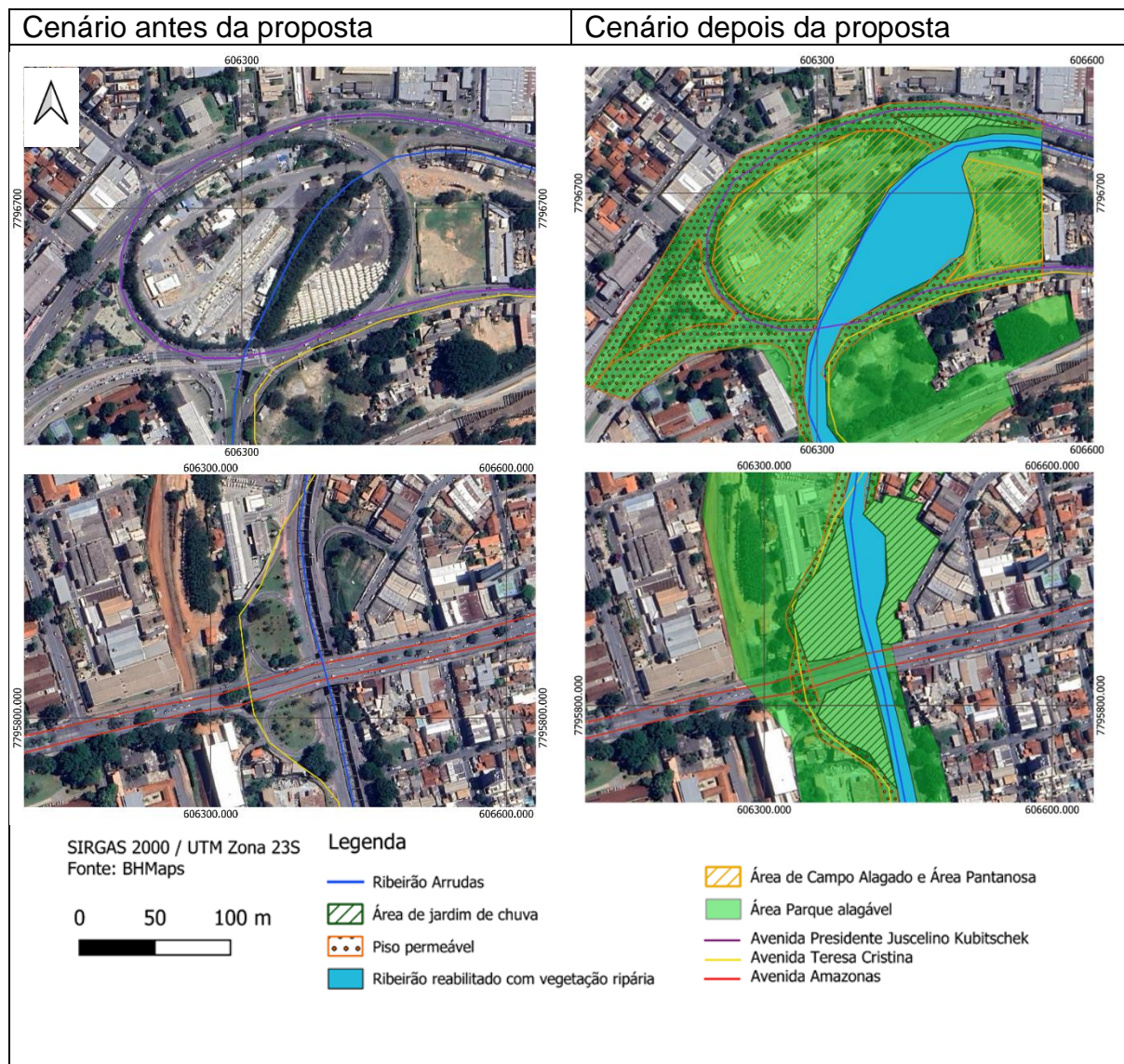
A Figura 68 evidencia duas áreas ampliadas do Trecho 1 que se destacam pela adequação espacial e funcional às intervenções propostas no parque alagável, com cenários de antes e depois das propostas. A conformação da planície fluvial, associada à disponibilidade de espaços livres contíguos ao leito do Ribeirão Arrudas, orienta a inserção dos jardins de chuva como elementos centrais do projeto, especialmente nas zonas de transição entre o tecido urbano consolidado e o curso d'água.

Nessas áreas, os jardins de chuva operam como dispositivos de mediação entre a drenagem viária e o sistema fluvial, enquanto os pisos permeáveis estruturam os percursos e áreas de uso público, contribuindo para a redução do escoamento superficial. As porções mais rebaixadas são destinadas a campos alagados e áreas pantanosas, compatíveis com a dinâmica natural das cheias, reforçando o papel do parque como espaço adaptável às variações hidrológicas. A recomposição da vegetação ripária acompanha o traçado do ribeirão, qualificando as margens e estabelecendo uma continuidade paisagística que integra os diferentes dispositivos do projeto.

Na figura 69 apresenta-se a ampliação da área de encontro do Ribeirão Arrudas com o córrego Cercadinho e de área no Trecho 2 no encontro com o ribeirão e o córrego Bonsucesso, também com cenários de antes e depois das propostas. Nessas áreas de confluência, marcadas por maior vulnerabilidade, a proposta reorganiza a planície fluvial por meio da ampliação controlada das áreas inundáveis, permitindo a dissipação da energia do escoamento e a acomodação dos volumes adicionais provenientes dos afluentes.

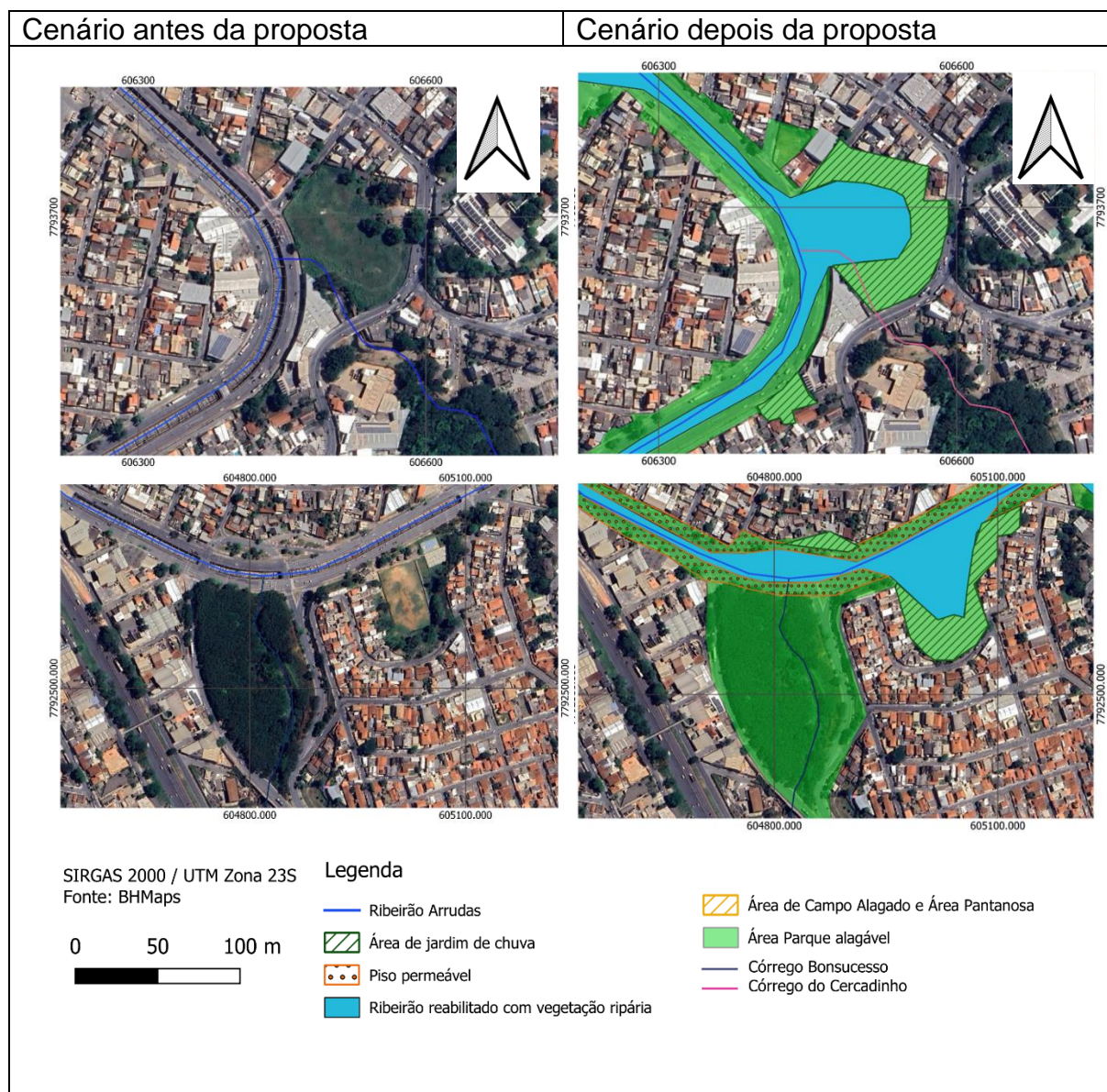
A inserção de soluções baseadas na natureza, também adotadas no Trecho 1, como os campos alagados e as áreas pantanosas, atua como elemento de transição entre os cursos d'água e o tecido urbano. De forma complementar, os jardins de chuva qualificam os espaços de contato com a malha edificada, favorecendo a infiltração e o retardamento do escoamento superficial.

Figura 68 – Ampliação da proposta de parque alagável e infraestrutura verde trecho1



Fonte: Autora, 2026.

Figura 69 – Ampliação da proposta de parque alagável e infraestrutura verde no Ribeirão Arrudas: integração com os córregos Cercadinho e Bonsucesso

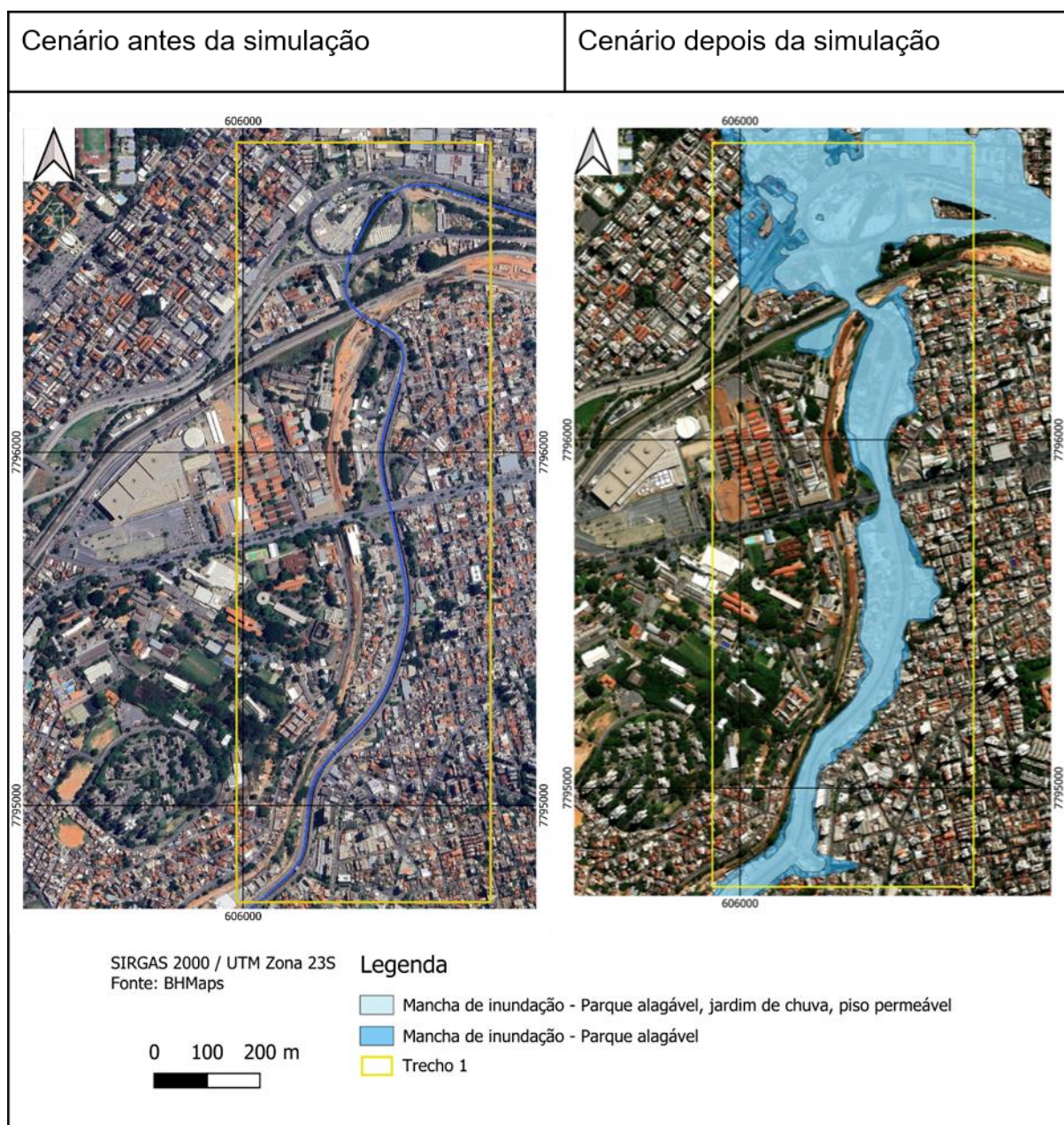


Fonte: Autora, 2026.

Nas figuras 70 e 71 apresenta se o mapa de manchas de inundação com simulação do cenário com infraestruturas nos trechos 1 e 2 respectivamente, onde foi utilizado o mapeamento das áreas apresentados na figura 67. Observa-se que a introdução de SbN, como o parque alagável revegetado com espécies ripárias, jardins de chuva e pavimentos permeáveis, contribui para a ampliação das zonas de infiltração e retenção de águas pluviais, promovendo a capacidade de amortecimento dos picos de cheia. Ao considerar as margens do Ribeirão Arrudas como áreas funcionais de absorção e dissipação da energia das águas, o modelo demonstra uma diminuição

da extensão da mancha de inundação, especialmente nas porções mais críticas da Avenida Teresa Cristina.

Figura 70 - Mapa de manchas de inundação com simulação do cenário com infraestruturas nos trechos 1



Fonte: Autora, 2026.

Figura 71 - Mapa de manchas de inundação com simulação do cenário com infraestruturas nos trechos 2



Fonte: Autora, 2026.

As simulações hidrodinâmicas dos dois cenários evidenciam a eficácia da implementação integrada das medidas de infraestrutura verde. Para a simulação, foram empregados diferentes valores de coeficiente de Manning, definidos conforme a rugosidade e a cobertura do solo, apresentado na tabela 2, o que permitiu representar as condições reais de escoamento e infiltração.

No cenário em que foram aplicadas múltiplas estratégias como a implantação do parque alagável, a revegetação das margens, a inserção de jardins de chuva e o uso de pisos permeáveis observa-se uma redução na extensão da mancha de inundação ao longo das margens do Ribeirão Arrudas. Essa diminuição ocorre sobretudo nos trechos de planície fluvial e nas áreas adjacentes ao leito do ribeirão, onde as intervenções ampliam a capacidade de retenção, infiltração e desaceleração do escoamento superficial. Os efeitos dessas medidas são evidenciados nas manchas de inundação correspondentes aos trechos 1 e 2, apresentadas, respectivamente, nas Figuras 70 e 71.

Em contrapartida, no cenário em que apenas o parque alagável foi considerado, a mancha de inundação permanece mais extensa. Essa comparação demonstra que as soluções de drenagem urbana de uma cidade esponja não devem ser aplicadas de forma isolada, mas sim de maneira integrada, a fim de potencializar sua eficiência hidrológica. Esses resultados reforçam o potencial das infraestruturas verdes como estratégia eficaz de mitigação de inundações urbanas e requalificação ambiental das margens fluviais, aproximando os trechos analisados dos princípios de uma cidade esponja, mais resiliente e sustentável.

6.2 Propostas de Diretrizes para o Planejamento Urbano

As Propostas de Diretrizes para o Planejamento Urbano com base no conceito de Cidade Esponja foram elaboradas a partir dos resultados obtidos nas simulações hidrodinâmicas e das análises de redução das manchas de inundação. As diretrizes aqui propostas buscam integrar o planejamento territorial, a infraestrutura verde e a gestão das águas urbanas, tendo como foco a transformação das áreas vulneráveis em espaços resilientes e multifuncionais.

Fundamentadas nas SbN, as propostas consideram tanto intervenções estruturais como parques alagáveis, jardins de chuva e pavimentos permeáveis, quanto ações

sociais e educativas, como a revegetação de áreas privadas, a requalificação das margens fluviais e a educação ecológica voltada à reconciliação da cidade com seus cursos d'água. Dessa forma, a importância do entendimento de que o enfrentamento dos problemas de inundação em Belo Horizonte depende da adoção de um modelo de urbanismo mais adaptativo, é reafirmado. Esse é capaz de aliar eficiência hidrológica, sustentabilidade ambiental e consciência coletiva sobre o papel da água no ambiente urbano.

Segundo Kongjian Yu (2024), em entrevista ao programa Fantástico em 2024 (G1, 2024), a água não deve ser encurralada, mas sim acolhida como parte do ambiente urbano, capaz de transformar catástrofes em paisagens de convivência e beleza. O arquiteto reforçava uma visão transformadora sobre a água nas cidades: em vez de encurralá-la em canais ou tubos de concreto. Kongjian Yu defendia que devemos dar à água espaço para existir, para fluir, para acumular e para retornar ao cotidiano urbano, sobretudo diante dos extremos climáticos que se intensificam. Ele propõe que essa água não seja tratada como vilã ou problema, mas como elemento vital que conecta paisagem, sociedade e natureza.

Como exemplo, apresenta-se uma obra do arquiteto que transforma uma antiga catástrofe hídrica em beleza, adaptando a paisagem para abraçar a água, permitir que ela chegue, que fique, que encha durante a cheia e que seja acessível durante a seca, possibilitando que as pessoas também se aproximem desse recurso. Dessa forma, seu trabalho assume a forma de uma carta aberta de esperança e respeito profundo à natureza, afirmando que a verdadeira infraestrutura urbana deve mais escutar e conviver com a água do que opor-se a ela porque na mudança climática, a água não é o adversário, mas sim o caminho para uma cidade mais resiliente e humana.

Com isso, a partir dos resultados obtidos foram elaboradas diretrizes com o intuito de orientar o planejamento urbano de Belo Horizonte sob a ótica do conceito de Cidade Esponja. Estas políticas públicas tem o objetivo de priorizar a integração entre infraestrutura verde, drenagem sustentável, requalificação ambiental e educação ecológica. Os resultados demonstraram que a aplicação combinada de SbN como parques alagáveis, áreas revegetadas com vegetação ripária, jardins de chuva e pisos permeáveis apresentam desempenho superior no controle de cheias e

na melhoria da qualidade ambiental em comparação com intervenções isoladas. Com base nessa constatação, propõem-se as seguintes diretrizes:

1. Gestão integrada das bacias urbanas – O planejamento deve seguir a abordagem por bacia hidrográfica, considerando a dinâmica de escoamento e os resultados das simulações com MDT Prodabel. Essa perspectiva permite identificar áreas prioritárias, avaliar impactos cumulativos e planejar ações preventivas.
2. Expansão das Soluções de Infraestrutura Verde para toda a extensão do Ribeirão Arrudas e córregos adjacentes – Propõe-se a ampliação das microestruturas de uma Cidade Esponja para toda a bacia do Ribeirão Arrudas e seus tributários, com o objetivo de reduzir as manchas de inundação e restaurar o equilíbrio hidrológico em escala metropolitana. Essa estratégia deve articular infraestruturas verdes e azuis interconectadas, promovendo a retenção, infiltração e armazenamento das águas pluviais ao longo de todo o sistema hidrográfico. A implementação gradual dessas medidas, alinhada ao planejamento urbano sustentável, visa transformar Belo Horizonte em uma Cidade Esponja, capaz de conviver harmoniosamente com seus cursos d'água e de fortalecer a resiliência hídrica, ecológica e social de seu território.
3. Reabilitação ecológica das margens fluviais – Recomenda-se a recuperação das faixas marginais do Ribeirão Arrudas com vegetação nativa densa, restabelecendo a função ecológica e hidrológica dessas áreas. Essa medida aumenta a permeabilidade do solo, reduz o escoamento superficial e melhora a capacidade de infiltração e amortecimento de cheias.
4. Implantação de sistemas de drenagem urbana sustentável com separação das redes de esgoto e águas pluviais – Implantação de um sistema de drenagem e saneamento integrado, no qual as águas pluviais sejam conduzidas de forma natural e permeável, enquanto o esgoto sanitário seja coletado e tratado separadamente, eliminando o despejo de efluentes e dejetos no canal do Ribeirão Arrudas. Ampliação dos programas que visam eliminar ligações clandestinas e direcionar o esgoto para coletores. Essas medidas contribuem para a recuperação da qualidade hídrica, o funcionamento do sistema urbano de drenagem e contribui para a reabilitação do curso d'água.

5. Implantação de parques alagáveis multifuncionais – As áreas mais suscetíveis às inundações, identificadas nas simulações, devem ser transformadas em parques alagáveis, conciliando lazer urbano, educação ambiental e controle de cheias. Esses devem ser projetados para acumular temporariamente a água das chuvas, com vegetação e topografia adaptadas à retenção e drenagem natural, funcionando como espaços de convivência entre a população e o ciclo hidrológico.
6. Aproveitamento de lotes públicos e privados e áreas subutilizadas – Propõe-se a incorporação de áreas públicas e privadas adjacentes às margens do ribeirão com potencial para revegetação ou uso ambiental, mediante instrumentos urbanísticos, incentivos fiscais e parcerias público-privadas. A revegetação densa em lotes ociosos contribui para o aumento da resiliência hídrica local e a recomposição ecológica da paisagem.
7. Reassentamento e desapropriação em áreas de risco – As moradias e os galpões localizadas em zonas suscetíveis a inundações recorrentes devem ser alvo de programas de reassentamento planejado, assegurando moradia digna em locais seguros. As áreas desapropriadas, com os galpões e os espaços ociosos, devem ser destinadas à criação de parque alagável e corredores ecológicos, ampliando o espaço de escoamento e mitigando os impactos das cheias.
8. Integração de microinfraestruturas verdes – Incentiva-se a disseminação de jardins de chuva, biovaletas, telhados verdes e pavimentos permeáveis em espaços públicos e privados, promovendo infiltração e controle descentralizado das águas pluviais. A interligação dessas microestruturas com o sistema natural de drenagem contribui para o equilíbrio hidrológico urbano.
9. Instrumentos de incentivo e regulação urbana – Mecanismos de incentivo à adoção de soluções de drenagem sustentável, devem ser fortalecidos, como redução de impostos, créditos ambientais e contrapartidas urbanísticas para empreendimentos que implementem infraestrutura verde e revegetação de áreas impermeáveis.
10. Educação ecológica e reconexão com a água – É fundamental promover programas de educação ambiental e cidadania hídrica, voltados à sensibilização

da população sobre a importância dos rios urbanos. A água não deve ser vista como uma vilã, mas como um elemento vital do sistema urbano, que precisa ser compreendido, respeitado e integrado ao cotidiano da cidade. A criação de espaços educativos no parque alagável e escolas próximas aos cursos d'água pode fortalecer essa relação simbiótica entre sociedade e meio ambiente.

11. Monitoramento e simulação contínua – As simulações hidrodinâmicas devem ser incorporadas ao planejamento urbano como ferramentas de monitoramento e atualização constante das políticas públicas, permitindo ajustes em função das transformações territoriais e climáticas. Deve se realizar o monitoramento das vazões no ribeirão através da implantação de estações fluviométricas mais próximas possibilitando a coleta de dados mais rápida e assertiva. Além disso, deve ser implantado mais estações pluviométricas para o acompanhamento das precipitações.

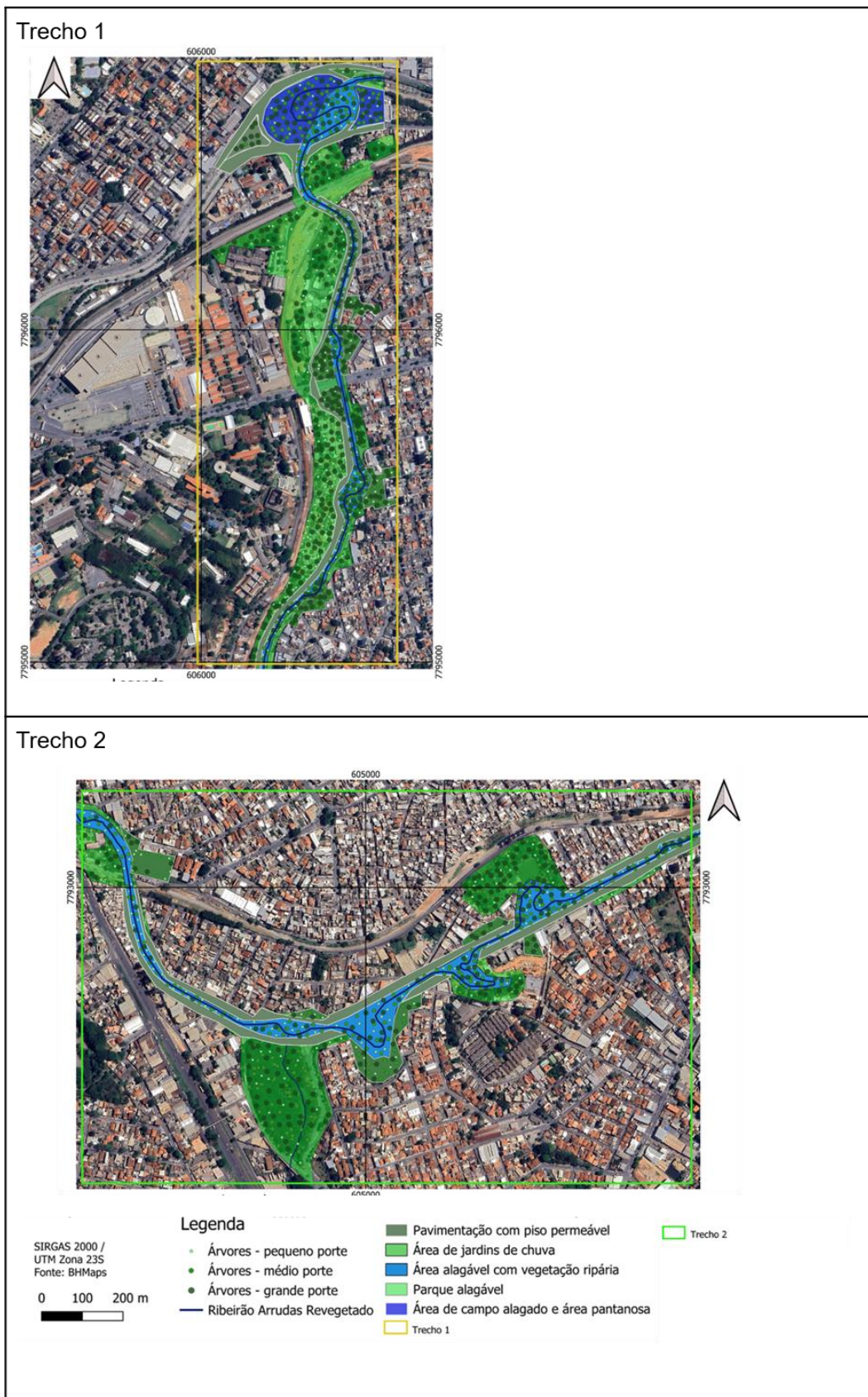
Essas diretrizes reafirmam que a resiliência hídrica urbana depende da existência equilibrada entre infraestrutura cinza e verde, articuladas em um sistema capaz de absorver, infiltrar e retardar o escoamento superficial. O Ribeirão Arrudas, nesse contexto, configura-se como um laboratório urbano para a aplicação dos princípios da Cidade Esponja, mostrando que a recuperação ecológica, o uso social das áreas de inundação e a educação ambiental são pilares essenciais para construir uma Belo Horizonte mais resiliente, sustentável e reconciliada com suas águas.

Os mapas apresentados na figura 72 ilustram a proposta de implantação de um Parque Esponja Alagável com arborização ao longo da Avenida Teresa Cristina, resultado do mapeamento. Nesta proposta, o objetivo é que o Ribeirão Arrudas fosse descanalizado e revegetado, recuperando seu curso natural por meio da formação de meandros e planícies alagáveis em alguns trechos, o que amplia a área de contato com o solo e aumenta a capacidade de infiltração e amortecimento das cheias. A distribuição das espécies foi planejada de forma a potencializar a permeabilidade e o equilíbrio ecológico, mantendo a arborização nativa existente e com o plantio de novas árvores de pequeno, médio e principalmente de grande porte de acordo com as condições de cada setor.

Nas margens, a revegetação ripária contribui para a estabilidade das encostas e para o sombreamento do curso d'água, além de atuar como uma esponja natural ao

longo do ribeirão. Nas áreas mais amplas, são propostos o parque alagável, os jardins de chuva e os pavimentos permeáveis, voltados ao aumento da retenção e da infiltração das águas pluviais. Essa configuração cria um sistema integrado de infraestrutura verde, que contribui para o controle natural do escoamento superficial, a melhoria microclimática e a valorização da paisagem, transformando o ribeirão em um elemento vivo e acessível dentro da malha urbana.

Figura 72 - Proposta de implantação de um Parque Esponja Alagável



Fonte: Autora, 2026.

As figuras 73, 74 e 75 sintetizam a proposta do parque alagável sob a ótica da arquitetura da paisagem, evidenciando a articulação entre hidrologia, vegetação e desenho dos espaços livres como um sistema integrado. A composição espacial combina áreas alagáveis e pantanosas, jardins de chuva, pisos permeáveis e a revegetação do Ribeirão Arrudas, configurando uma paisagem funcional que absorve, retém e redistribui as águas pluviais, ao mesmo tempo em que qualifica o espaço urbano.

A estratégia de distribuição das árvores segue uma lógica ecológica e hidráulica: espécies de pequeno e médio porte são inseridas ao longo dos percursos e nas áreas de transição, contribuindo para sombreamento, conforto ambiental e infiltração superficial. O plantio de árvores de grande porte concentra-se nas zonas mais críticas do parque, onde a mancha de inundação é mais expressiva e onde se identificam áreas ociosas, como *fringe belts* e grandes espaços livres. Nessas porções, a presença de indivíduos arbóreos de maior porte justifica-se pela elevada capacidade de interceptação da água da chuva e pela maior capilaridade de seus sistemas radiculares, que ampliam a absorção da água no subsolo, estabilizam o solo e reforçam o papel do parque como infraestrutura verde da paisagem fluvial.

Figura 73 – Estudo de ampliação da proposta de implantação do parque alagável e da infraestrutura verde – Trecho 1



Legenda

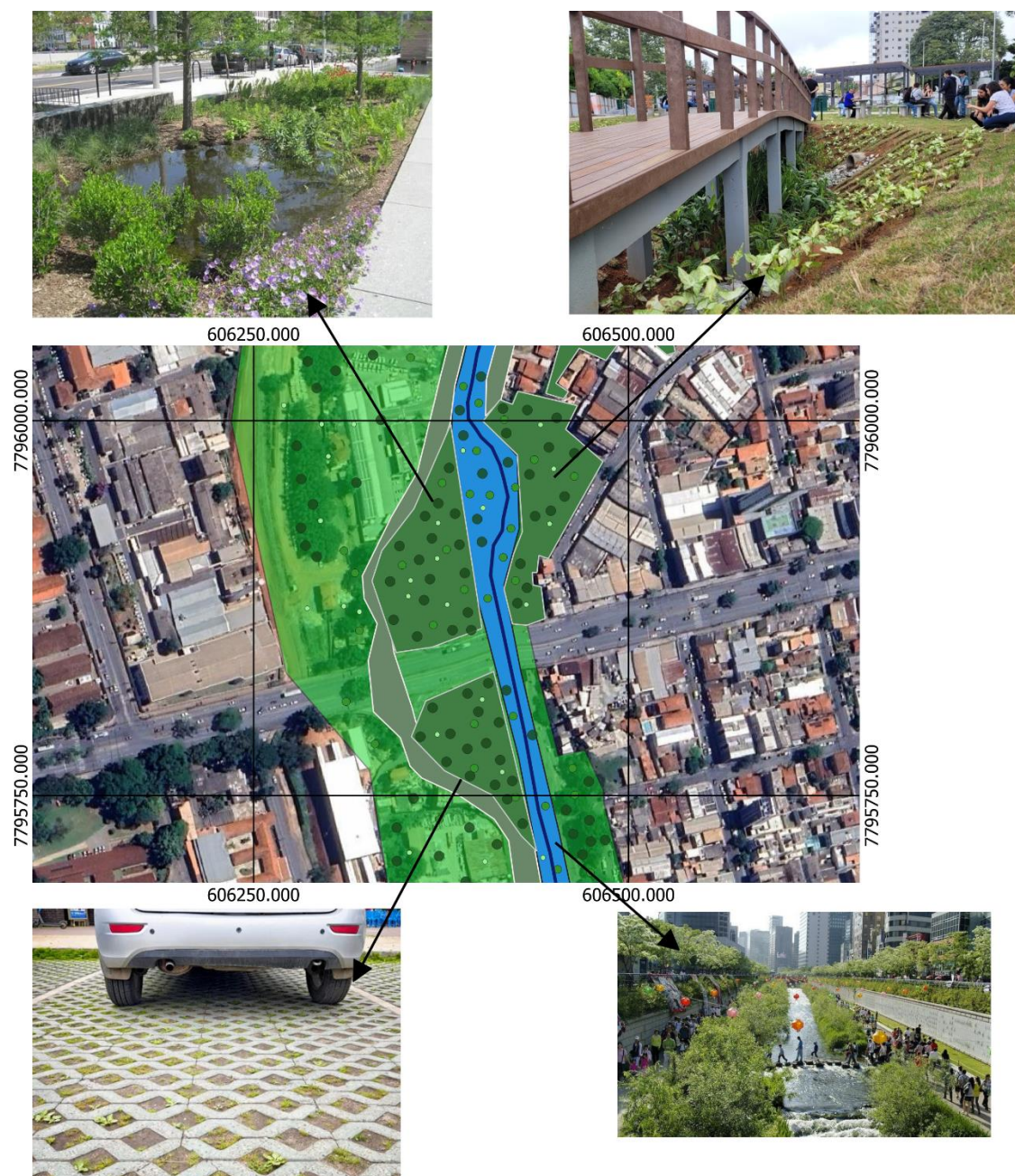
- Árvores - pequeno porte
- Árvores - médio porte
- Árvores - grande porte
- Ribeirão Arrudas Revegetado
- Pavimentação com piso permeável
- Área de jardins de chuva
- Área alagável com vegetação ripária
- Parque alagável
- Área de campo alagado e área pantanosa



SIRGAS 2000 / UTM Zona 23S
 Fonte: BHMmaps

Fonte: Autora, 2026, com base em referências conceituais de infraestrutura verde e cidades esponja.

Figura 74 – Estudo de ampliação da proposta de implantação do parque alagável e da infraestrutura verde – Trecho 1



Legenda

- Árvores - pequeno porte
- Árvores - médio porte
- Árvores - grande porte
- Ribeirão Arrudas Revegetado
- Pavimentação com piso permeável
- Área de jardins de chuva
- Área alagável com vegetação ripária
- Parque alagável
- Área de campo alagado e área pantanosa



SIRGAS 2000 / UTM Zona 23S
 Fonte: BHMmaps

Fonte: Autora, 2026, com base em referências conceituais de infraestrutura verde e cidades esponja.

Figura 75 – Estudo de ampliação da proposta de implantação do parque alagável e da infraestrutura verde – Trecho 2



Legenda

- Árvores - pequeno porte
- Árvores - médio porte
- Árvores - grande porte
- Ribeirão Arrudas Revegetado
- Pavimentação com piso permeável
- Área de jardins de chuva
- Área alagável com vegetação ripária
- Parque alagável
- Área de campo alagado e área pantanosa

0 50 100 m

SIRGAS 2000 / UTM Zona 23S
 Fonte: BHMmaps

A fim de avaliar de forma objetiva os impactos da proposta de intervenção no Ribeirão Arrudas, foi elaborada uma análise comparativa entre o cenário atual e o cenário projetado, com base em indicadores hidrológicos e espaciais relevantes (tabela 3). Os dados apresentados na tabela resultam da integração entre as simulações hidrodinâmicas realizadas no modelo HEC-RAS, utilizando o MDT disponibilizado pela Prefeitura de Belo Horizonte, e as análises espaciais desenvolvidas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), incluindo informações de uso e ocupação do solo e cobertura da superfície. Essa abordagem permitiu quantificar as alterações na dinâmica do escoamento, na extensão das áreas inundáveis e na distribuição das superfícies permeáveis e impermeáveis, fornecendo subsídios técnicos para a avaliação da eficiência das soluções baseadas na natureza propostas no projeto.

Tabela 3 – Comparação dos cenários hidrológicos e espaciais (valores estimados)

| Parâmetro | Cenário Atual | Cenário Proposto | Variação (%) |
|--|----------------------|-------------------------|---------------------|
| Área total inundada (ha) | 42,5 | 28,3 | -33,4% |
| Área inundada – alta profundidade (m ²) | 185.000 | 102.000 | -44,9% |
| Área inundada – baixa profundidade (m ²) | 240.000 | 180.000 | -25,0% |
| Área permeável (%) | 18% | 42% | +133,3% |
| Área impermeável (%) | 82% | 58% | -29,3% |
| Área de infraestrutura verde (m ²) | 35.000 | 120.000 | +242,8% |
| Extensão de curso naturalizado (m) | 0 | 3.200 | — |
| Velocidade média do escoamento (m/s) | 2,1 | 1,4 | -33,3% |
| Tempo de concentração (min) | 18 | 27 | +50,0% |

Fonte: Autora, 2026.

A análise dos parâmetros hidrológicos e espaciais evidencia alterações relevantes no comportamento do sistema após a implementação do cenário proposto. Destacam-se, inicialmente, as variações na área total inundada e na distribuição das manchas por profundidade, que indicam uma redução mais significativa nas zonas de maior risco. Paralelamente, observa-se o aumento das superfícies permeáveis e das áreas destinadas à infraestrutura verde, refletindo uma mudança na

configuração do uso e ocupação do solo. No que se refere aos parâmetros hidráulicos, a redução da velocidade média do escoamento e o aumento do tempo de concentração demonstram uma resposta mais lenta e controlada do sistema frente aos eventos de precipitação.

Observa-se uma redução expressiva das áreas inundadas, especialmente nas zonas de maior profundidade, associada ao aumento significativo das superfícies permeáveis e da infraestrutura verde. A diminuição da velocidade do escoamento e o aumento do tempo de concentração indicam maior capacidade de retenção e amortecimento das cheias no cenário proposto. Esses resultados evidenciam a relação direta entre os parâmetros analisados e a eficácia das soluções adotadas, reforçando o papel das estratégias de drenagem sustentável na mitigação dos impactos hidrológicos em áreas urbanas.

O projeto representa a transformação do Ribeirão Arrudas em um eixo ecológico urbano, com o curso d'água descanalizado e permitindo o restabelecimento de meandros e planícies de inundação. Ao longo das margens, observa-se a presença de vegetação ripária diversificada, com espécies nativas de diferentes portes e tonalidades, favorecendo a biodiversidade e a permeabilidade do solo. Elementos de infraestrutura verde, como jardins de chuva, áreas alagáveis e pisos drenantes, integram-se ao espaço público, promovendo o manejo sustentável das águas pluviais. Passarelas elevadas percorrem o parque, conectando as margens e permitindo a vivência segura e contemplativa da água, mesmo durante as cheias, simbolizando o novo paradigma urbano que busca conviver com a água, e não combatê-la.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise histórica, paisagística e geohidrológica do Ribeirão Arrudas demonstrou que sua transformação ao longo do tempo reflete o próprio processo de urbanização de Belo Horizonte. Esse foi marcado por sucessivas intervenções que priorizaram o controle hidráulico e a expansão urbana em detrimento do equilíbrio ambiental. A canalização e a retificação do curso d'água, inicialmente vistas como símbolos de modernidade e progresso, resultaram na supressão da vegetação ripária, na impermeabilização das margens e na perda das funções ecológicas do sistema

hídrico. Essa trajetória consolidou um modelo urbano vulnerável, onde a recorrência de inundações e os impactos ambientais tornaram-se expressões diretas de um planejamento fragmentado e tecnicista, pouco sensível à dinâmica natural da paisagem.

As simulações hidrodinâmicas realizadas possibilitaram compreender, de forma detalhada, a propagação das inundações e a resposta hidrológica da bacia do Arrudas diante de diferentes condições de uso e ocupação do solo. Nesse sentido, a leitura integrada dos coeficientes de rugosidade de Manning associados ao mapeamento do uso e da ocupação do solo demonstrou que a configuração da paisagem urbana exerce influência direta sobre o comportamento hidrológico do Ribeirão Arrudas. A comparação entre os modelos evidenciou que o aumento da rugosidade superficial e da permeabilidade, representado pela inserção de áreas vegetadas, alagáveis e pavimentos permeáveis, promove a redução da mancha de inundação, especialmente nas margens da Avenida Teresa Cristina. Esses resultados confirmam a eficácia das soluções baseadas na natureza e das infraestruturas verdes como instrumentos de mitigação de riscos hídricos e de requalificação ambiental em contextos urbanos densamente ocupados.

Complementarmente, destaca-se que a precisão dos dados de entrada como os modelos digitais de terreno (MDT) e os mapas de uso e ocupação do solo, sendo determinante para a confiabilidade das análises e do planejamento urbano. Quanto maior a acurácia dessas informações, mais consistentes serão os resultados obtidos. Além disso, a integração desses dados com áreas de interesse do mercado imobiliário permite qualificar a tomada de decisão, contribuindo para maior transparência nos processos e ampliando a segurança para os usuários e investidores finais.

O mapeamento e a proposta de implantação do Parque Esponja Alagável na Avenida Teresa Cristina representam a materialização prática dos princípios das Cidades Esponja, conciliando drenagem urbana sustentável, recuperação ecológica e reaproximação da população com os corpos d'água. A partir da descanalização e da revegetação do Ribeirão, com a criação de meandros e planícies alagáveis, o projeto demonstra que pode ser factível reverter processos de degradação histórica por meio de intervenções integradas entre engenharia, ecologia e urbanismo. A

introdução de vegetação ripária, jardins de chuva, biovaletas, passarelas elevadas e pavimentos drenantes simboliza a transição de uma infraestrutura cinza para uma infraestrutura viva e verde, que absorve, armazena e reutiliza a água de forma inteligente.

Sob a ótica dos *fringe belts*, observa-se que os setores com maiores proporções de espaços livres intraquadra concentram-se nas proximidades das áreas mais suscetíveis às inundações. Essa configuração evidencia a relação entre baixa intensidade de ocupação, maior disponibilidade de solo permeável e localização em zonas hidrologicamente sensíveis, reforçando a adequação desses espaços para a implementação de estratégias de adaptação às cheias. Além disso, a presença de grandes parcelas pouco adensadas, frequentemente ocupadas por galpões, amplia a viabilidade de processos de desapropriação e reordenamento territorial, fundamentais para a implantação do parque alagável e de soluções baseadas na natureza ao longo do Ribeirão Arrudas e de seus afluentes.

Contudo, as diretrizes e simulações desenvolvidas neste trabalho reforçam a necessidade de um planejamento urbano sistêmico e adaptativo, que reconheça a água como elemento estruturador da paisagem e não como obstáculo ao desenvolvimento. A ampliação das soluções de infraestrutura verde para toda a extensão do Ribeirão Arrudas e seus afluentes, aliada a políticas públicas de educação ecológica, reassentamento seguro da população. Aliam-se a essas medidas, o incentivo à revegetação de áreas privadas, o que pode constituir o caminho para uma Belo Horizonte mais resiliente, sustentável e integrada à sua geografia natural. Assim, esta pesquisa não apenas contribui para o entendimento técnico dos processos hidrodinâmicos urbanos, mas também oferece subsídios para a construção de uma cidade que aprende a conviver, respeitar e prosperar com a água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SÁBER, Aziz Nacib. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

ALLALOU, Rania et al. BIM-GIS integrated hydrodynamic modeling for road flood risk assessment: a case study in Algeria's Chiffa Wadi. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 267, p. 111906, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111906>. Acesso em: 05 fev. 2026.

ALMEIDA, L. Q. de; CARVALHO, P. F. de. Representações, riscos e potencialidades de rios urbanos: análise de um (des) caso histórico. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 11, n. 34, p. 145–161, 2010. Disponível em: <https://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15391>. Acesso em: 15 maio 2025.

ALMEIDA, Samuel Costa; BRITO, Gabriela Pedroza; SANTOS, Sylvana Melo. Revisão Histórica dos Telhados Verdes: da Mesopotâmia aos dias atuais. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, [S. l.], v. 2, n. 1, 2018. Disponível em: <https://revistabrasileirademeioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/64>. Acesso em: 9 set. 2025.

AMARAL, Rubens; COSTA, Stael de Alvarenga Pereira; MUZZI, Maria Rita Scotti. O sequestro de carbono em trechos da floresta urbana de Belo Horizonte: por um sistema de espaços livres mais eficiente no provimento de serviços ecossistêmicos urbanos. **Paisagem e Ambiente**, São Paulo, Brasil, n. 39, p. 163–179, 2017. DOI: 10.11606/issn.2359-5361.v0i39p163-179. Disponível em: <https://revistas.usp.br/paam/article/view/109272>. Acesso em: 25 nov. 2025.

ARAÚJO, Heuryson Ferreira. **Modelagem hidrodinâmica e análise geoespacial aplicadas à avaliação do risco de ruptura de barragens: estudo de caso barragem de Galego, Sabará - MG**. 2025. 71 fl. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós- Graduação do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/home>. Acesso em: 10 jan. 2026.

ARCEMENT, G. J.; SCHNEIDER, V. R. **Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains**. Washington, D.C.: United States Geological Survey, 1989. (Water-Supply Paper, 2339).

Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/wsp/2339/report.pdf>. Acesso em: 27 set. 2025.

ARONOFF, S. **Geographic Information Systems: a management perspective**. Ottawa: WDL Publications, 1989.

ASIAN DEVELOPMENT BANK (ADB). **Sponge Cities: Integrating Green and Gray Infrastructure to Build Climate Change Resilience in the People's Republic of China**. **ADB Briefs**, No. 222, November 2022. Manila: Asian Development Bank, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.22617/BRF220416-2>. Acesso em: 10 set. 2025.

ASSIS, W. L. **O sistema clima urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva têmporo-espacial**. 2010. 319 fl. Tese de Doutorado. Programa de Pós- Graduação em Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/items/a1deefdc-0aa4-49d7-b91c-bd06554f0ca9>. Acesso em: 5 jul. 2025.

AVELINO, Patrícia Helena Mirandola. A trajetória da tecnologia de sistemas de informação geográfica (SIG) na pesquisa geográfica. **Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros**, Seção Três Lagoas, Três Lagoas, p. 21-37, 2004. Disponível em: <http://www.agb.org.br/publicacoes/index.php/Trabalhos/article/view/190>. Acesso em: 14 set. 2025.

AZEVEDO, Edinam Ferreira de et al. **Desafios e contradições da governança ambiental em áreas de preservação permanente do rio Araguaia**, em Araguatins (TO). *Research, Society and Development*, v. 14, n. 4, p. e6814448699, 2025. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/48699>. Acesso em: 10 ago. 2025.

BALDESSAR, Sílvia Maria Nogueira. **Telhado verde e sua contribuição na redução da vazão da água pluvial escoada**. 2012. 125 fl. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós- Graduação em Engenharia da Construção Civil - Departamento de Construção Civil do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/52621> Acesso em: 10 mai. 2024.

BARNES, H. H. **Roughness Characteristics of Natural Channels**. Washington, D.C.: United States Geological Survey, 1967. (Water-Supply Paper, 1849).

Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://pubs.usgs.gov/wsp/wsp_1849/pdf/wsp_1849.pdf. Acesso em: 27 set. 2025.

BARRETO, Abílio. **Belo Horizonte**: memória histórica e descritiva – história antiga e história média. v. 2. Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro, Centro de Estudos Históricos e Culturais, 1996. Disponível em: <https://www.bibliotecadigital.mg.gov.br/consulta/consultaDetalheDocumento.php?iCodDocumento=53259>. Acesso em: 27 set. 2024.

BASE AEROFOTO. **O Modelo Digital de Elevação (MDE) explicado**. Base Aerofoto, 2023. Disponível em: <https://www.baseaerofoto.com.br/o-modelo-digital-de-elevacao-mde-explicado/>. Acesso em: 15 set. 2025.

BELO HORIZONTE-MG. Prefeitura Municipal: **Acervo cartográfico e geográfico – BHGEO**, 2024. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/bhgeo/acervo-cartografico>. Acesso em: 27 set. 2025.

BELO HORIZONTE. Prefeitura Municipal. **Plano Diretor do Município de Belo Horizonte**. Lei nº 7.166, de 27 de agosto de 1996. Belo Horizonte, 1996. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/b/belo-horizonte/lei-ordinaria/1996/716/7166/lei-ordinaria-n-7166-1996-estabelece-normas-e-condicoes-para-parcelamento-ocupacao-e-uso-do-solo-urbano-no-municipio>. Acesso em: 05 fev. 2026.

BELO HORIZONTE. Prefeitura Municipal. **Plano Diretor de Drenagem de Belo Horizonte – Atlas dos Diagramas dos Canais Revestidos do Sistema de Macrodrenagem – Bacia do Ribeirão Arrudas**. v. A, p. 157, 2002. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br>. Acesso em: 27 abr. 2025.

BELO HORIZONTE. Prefeitura Municipal. **BH Verde**: programa de áreas verdes de Belo Horizonte. Belo Horizonte: Prefeitura de Belo Horizonte, 2002. Disponível em: <https://bhverde.com.br/>. Acesso em: 26 abr. 2025.

BELO HORIZONTE. Prefeitura Municipal. **Instrução técnica para elaboração de estudos e projetos de drenagem**. Belo Horizonte: Prefeitura Municipal, 2022. Capítulo 1: Drenagem urbana em Belo Horizonte. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/obras-einfraestrutura/informacoes/publicacoes/instrucao->

estudos-e-projetos-de-drenagem#Captulo1DrenagemUrbanaemBeloHorizonte
Acesso: 22 mar. 2024.

BELO HORIZONTE. Prefeitura Municipal. **Carta de inundações – Bacia Hidrográfica do Ribeirão Arrudas**: modelagem hidrológica e hidráulica das inundações na bacia do Ribeirão Arrudas. Belo Horizonte: Prefeitura Municipal, 2023. 66 p. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/planejamento/estudos-tecnicos/carta-de-inundacoes-arrudas.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2024.

BELO HORIZONTE. Prefeitura Municipal. **Manual técnico de manutenção Jardins de Chuva**. Belo Horizonte: Prefeitura Municipal, 2024a.

BELO HORIZONTE. **Decreto Municipal n. 18.706, de 2024**. Dispõe sobre Cria o Programa Adote um Jardim de Chuva e dispõe sobre a concessão de desconto no pagamento do Imposto sobre a Propriedade Predial e Territorial Urbana – IPTU Disponível em: <https://www.cmbh.mg.gov.br/atividade-legislativa/pesquisar-legislacao/decreto/18706/2024>. Acesso em: 2 jun. 2025

BELTRAME, A. da V. **Diagnóstico do meio físico em bacias hidrográficas**: modelos e aplicações. Florianópolis: Editora da UFSC, 1994.

BERARDI, U.; GHAFARIANHOSEINI, A. H.; GHAFARIANHOSEINI, A. **State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs**. Applied Energy, v. 115, p. 411-428, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>. Acesso em: 10 set. 2025.

BLEDOW, Gustavo Diego. **Modelagem dinâmica espacial**: cartografia prospectiva e o valor da terra. 2023. 89 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

BOKADE, Mrunal S.; SINGH, Devendra Narain. Discussion on “Pollution mitigation in urban runoff via fully recycled-aggregate pervious concrete incorporating bauxite residue and rice husk biochar”. **Construction and Building Materials**, v. 505, p. 144708, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061825048603>. Acesso em:

20 mar. 2026.

BONZI, R. S. **Andar sobre a água**: a aplicação da Infraestrutura Verde em áreas densamente urbanizadas. 2015. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

BORSAGLI, Alessandro. **O Vale do Córrego do Leitão em Belo Horizonte**: contribuições da cartografia para compreensão de sua ocupação. Seminário Brasileiro de Cartografia Histórica, v. 1, 2011.

BORSAGLI, Alessandro. **Do convívio à ruptura**: a cartografia na análise histórico pluvial de Belo Horizonte (1894-1977). 2019. 224f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Disponível em: http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/TratInfEspacial_BorsagliA_1.pdf. Acesso em: 10 fev. 2021.

BOSSLER, R. C. **QGIS do ABC ao XYZ**. São Paulo: Íthala, 2016.

BRASIL. **Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI)**. Programa CBERS: cooperação Brasil-China em satélites de sensoriamento remoto. Brasília: MCTI, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/assuntos/cbers>. Acesso em: 15 set. 2025.

BRAUN, Julia. **Como conter enchentes no Brasil, segundo criador das 'cidades-esponja'**: 'Barragens estão fadadas ao fracasso'. 2024. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/articles/ce44n8n14ewo> Acesso em: 22 mai. 2024.

BUDGE, Trevor et al. Sponge cities and small towns: a new economic partnership. **The changing nature of Australia's country towns**, p. 38-52, 2006. <https://www.academia.edu/download/3252402/budge.pdf> Acesso em: 03 fev. 2026.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford: Oxford University Press, 1986.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 1998.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M.

- V. (orgs.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São Paulo: INPE, 2001. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>. Acesso em: 14 set. 2025.
- CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. Conceitos básicos em ciência da geoinformação. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (orgs.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São Paulo: INPE, 2001. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>. Acesso em: 14 set. 2025.
- CAMPOS, Ana Flávia. **Simulação no software HEC-RAS da mancha de inundação do rio Itabirito na cidade de Itabirito-MG para diferentes períodos de retorno**. 2023. 62 f. 2023. Trabalho Final de Curso Engenharia Civil na Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023. Disponível em: <https://monografias.ufop.br/handle/35400000/5156> Acesso em: 11 nov. 2024.
- CANHOLI, Aluísio Pardo. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- CAO, Yan et al. Research on road parametric modeling and dynamic lightweighting methods driven by BIM-GIS integration. **PLoS One**, v. 21, n. 1, p. e0340062, 2026. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0340062&type=printable> Acesso em: 03/02/2026.
- CARNEIRO, V. A. et al. Pressão Urbana e Alterações Ambientais no Córrego da Onça em Goiânia/GO. **Revista Territorial (ISSN 2317-0360)**, v. 15, n. Fluxo contínuo, p. 1-28, 2026. Disponível em: <https://www.revista.ueg.br/index.php/territorial/article/view/17622> Acesso em: 03/02/2026.
- CARVALHO, M. M. de; LIMA, L. A. de. **Água e cidade: a (in)visibilidade dos cursos d'água em Belo Horizonte**. In: Anais do XIII ENANPUR, 2009.
- CARVALHO, Fabiana Ferreira. **Centro cultural como promotor de sustentabilidade - Estudo de caso: Centro Cultural Fundação Progresso, Lapa-RJ**. 2021. 91 f. 2021. Monografia de Especialização Programa de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/35368>. Acesso em: 03 dez. 2024.

CASTAGNA, Guilherme. **Guia prático de jardins de chuva para cidades**. SOS Mata Atlântica, Instituto Nova Água. 1- ed. São Paulo: [s.n], 2023.

CHAI, Hua et al. Unlocking the carbon mitigation potential of green infrastructure: evidence from China's sponge city program. **Environmental Science & Technology**, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c14290>. Acesso em: 20 mar. 2026.

CHAN, F. K. S.; JIANG, C.; MAN, K. "Sponge city" in China—a breakthrough of planning and flood risk management in the urban context. **Land Use Policy**, v. 76, p. 772–778, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.03.005>. Acesso em: 14 abr. 2025.

CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS. **Cartilha Unidade Territorial Estratégica e Plano Diretor de Recursos Hídricos - UTE Ribeirão Arrudas**. Belo Horizonte, 12 p. 2016. Disponível em: https://cbhvelhas.org.br/wp-content/uploads/2016/04/06_cartilha_arrudas_225x27cm_2016_04_13_issuuu.pdf. Acesso em: 10 fev. 2021.

CONGEDO, Luca. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. **Journal of Open Source Software**, v. 6, n. 64, p. 3172, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21105/joss.03172>. Acesso em: 14 set. 2025.

CONZEN, M. P. **How cities internalize their former urban fringes**: a cross-cultural comparison. *Urban Morphology*, Birmingham, v. 13, n. 1, p. 29–54, 2009.

COON, W. F. **Estimation of Roughness Coefficients for Natural Stream Channels with Vegetated Banks**. Troy, New York: United States Geological Survey, 1998. (Water-Supply Paper, 2441). Disponível em: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcgclefindmkaj/https://pubs.usgs.gov/wsp/2441/report.pdf>. Acesso em: 27 set. 2025.

CORMIER, Nathaniel S.; PELLEGRINO, Paulo Renato Mesquita. Infra-estrutura verde: uma estratégia paisagística para a água urbana. **Paisagem e Ambiente**, São Paulo, Brasil, 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: 18 abr. 2024.

COSTA, Mateus Oliveira; RODRIGUES, Camila Ribeiro. **Impacto das mudanças climáticas na drenagem urbana**. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, v. 10, n. 1, p. 1-12, 2025. Disponível em: <https://www.revista.unipacto.com.br/index.php/multidisciplinar/article/view/4062>.

Acesso em: 10 ago. 2025.

COSTA, Staël de Alvarenga Pereira. A expansão das cidades brasileiras: um processo sem fim. **Paisagem e Ambiente**, São Paulo, Brasil, n. 22, p. 257–266, 2006. DOI: 10.11606/issn.2359-5361.v0i22p257-266. Disponível em: <https://revistas.usp.br/paam/article/view/90663>. Acesso em: 28 jun. 2024.

COSTA, Staël de Alvarenga Pereira et al. **Laboratório da Paisagem. Os sistemas de espaços livres e a constituição da esfera pública contemporânea: estudos de caso em metrópoles-cidades e novas territorialidades urbanas brasileiras – Núcleo Belo Horizonte**. 2009b. Relatório final de pesquisa financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura, 2009. Disponível em: acervo institucional da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais. Acesso em: 17 dez. 2025.

COSTA, Staël de Alvarenga Pereira; ÁLVARES, Lúcia Capanema; MACIEL, Marieta Cardoso; VILLEFORT TEIXEIRA, Maria Cristina; COIMBRA, Valesca Brandão Cerqueira; SIMÃO, Karina machado de Castro; PERNA, Stefania de Araújo; GODINHO, Luana rodrigues. Os espaços livres na paisagem de Belo Horizonte. **Paisagem e Ambiente**, São Paulo, n. 26, p. 51–72, 2009. Disponível em: acervo digital da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Acesso em: 17 dez. 2025.

COSTA, Stael de ALVARENGA Pereira; VILLEFORT TEIXEIRA, M. C. .; GIMMLER NETTO, M. M.; SALGADO, M.; DE SOUSA, E. A. . Fringe belts em uma perspectiva brasileira. **Revista de Morfologia Urbana**, [S. l.], v. 12, n. 2, 2025. DOI: 10.47235/rmu.v12i2.411. Disponível em: <https://revistademorfologiaurbana.org/index.php/rmu/article/view/411>. Acesso em: 17 dez. 2025.

COWEN, D. J. **GIS versus CAD versus DBMS: What are the differences.** Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 54, n. 11, p. 1551-1554, 1988. Disponível em: <https://www.asprs.org/>. Acesso em: 14 set. 2025.

CREMON, Édipo Henrique; BETTIOL, Giovana Maranhão; JÚNIOR, João Paulo Magna; MACEDO, Fabio Campos; RABELO, MaxWell de Oliveira. Avaliação da altimetria do MDE COP-30 no Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 74, n. 3, p. 536-546, 2022.

CRESWEL, John W. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto.** Porto Alegre: Artmed.2007. ISBN 978-85-363-0892-0

DELPOUX, Marcel. **Écologie du paysage.** Paris: Masson, 1974.

ELMIRO, Marcos Antônio Timbó; Borges, André Ferreira; Nero, Marcelo Antonio; Temba, Plínio da Costa. Sistemas geodésicos de referência adotados no Brasil e a conversão dos dados geográficos para o sistema oficial SIRGAS2000: transformações e avaliação de erros. **Revista Geografias**, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/geografias/article/view/12909>. Acesso em: 16 jan. 2025.

ENGMAN, E. T. Roughness Coefficients for Routing Surface Runoff. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 112, n. 1, p. 39-53, 1986. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1986\)112:1\(39\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1986)112:1(39)). Acesso em: 27 set. 2025.

EVERT, Ray F.; EICHHORN, Susan E. **Biologia vegetal.** 8. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2014.

FELGUEIRAS, Carlos Alberto. **Análises sobre modelos digitais de terreno em ambiente de sistemas de informações geográficas.** São José dos Campos: DPI/INPE, 1999.

FERNANDES, Antoniel Silva. **Evolução espaço-temporal das áreas verdes do município de Belo Horizonte (MG).** Dissertação de Mestrado em Geografia – Tratamento da Informação Espacial – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/TratInfEspacial_FernandesAS_1.pdf. Acesso em: 27 set. 2024.

FERREIRA, N. C. **Apostila de Sistema de Informações Geográficas**. Apostila da disciplina Sistema de Informações Geográficas da Coordenação da Área de Geomática do Centro Federal de Educação Tecnológica do Estado de Goiás para aulas do Curso Superior de Tecnologia em Geoprocessamento. Goiânia, 2006.

FITZ, P. R. **Cartografia básica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. **Iniciação em sensoriamento remoto**. Oficina de textos, 2007.

FLORIAN, Maria Cristina. **Paisagista Kongjian Yu, pioneiro do conceito de "cidade esponja", recebe o Prêmio Oberlander 2023**. 2023. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/1008501/paisagista-kongjian-yu-pioneiro-do-conceito-de-cidade-esponja-recebe-o-premio-oberlander-2023>. Acesso em: 28 out. 2023.

FONTOURA, Rodrigo Weber da. A catástrofe das enchentes do Rio Grande do Sul: primeiras considerações etnográficas. **RELACult** – Revista Latino-Americana de Estudos em Cultura e Sociedade, v. 11, 2025. Disponível em: <https://periodicos.claec.org/index.php/relacult/article/view/2542>. Acesso em: 10 ago. 2025.

FORMAN, Richard T.T; GODRON, Michel. **Landscape Ecology**. United States of America: John Wiley & Sons, Inc. 1986.

FRANÇA, Leandro Luiz Silva de; ALMEIDA, Antônio Diego Oliveira de; PENHA, Alex de Lima Teodoro da. **Avaliação da qualidade dos modelos digitais de elevação Aster e SRTM para o Estado da Bahia**. Revista Brasileira de Cartografia, n. 69/9, p. 1677-1686, 2017.

GONÇALVES, Felipe Silva; NASCIMENTO, Vânia Lúcia Quadros; COSTA, Francisco Emerson Vale. Política pública de turismo e rios urbanos em Belém (Pará, Brasil). **Cenário**: Revista Interdisciplinar em Turismo e Território, v. 13, p. 1, 2025. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10159987>. Acesso em: 11 ago. 2025.

GOULART, Patrícia Pascoal; CRUZ, Raphael Elias Pereira da. Proposta da rede de monitoramento das águas Subterrâneas na sub-bacia do Ribeirão Arrudas, região Central de Belo Horizonte-MG. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2012. 4 p. Disponível

em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27769>. Acesso em: 8 abr. 2024.

HAN, H.; ZENG, Q.; JIAO, J. Quality assessment of TanDEM-X DEMs, SRTM and ASTER GDEM on selected Chinese sites. **Remote Sensing**, v. 13, n. 7, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs13071304> Acesso em: 15 set. 2025.

HE, Bao-Jie; ZHU, Jin; ZHAO, Dong-Xue; GOU, Zhong-Hua; QI, Jin-Da; WANG, Jun-Song. Co-benefits approach: Opportunities for implementing sponge city and urban heat island mitigation. **Land Use Policy**, v. 86, p. 147–157, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837718308111?casa_token=ocOTv9nSsMkAAAAA:zuNyZvBXO_WWEiJexbw6HcBGk0atk1UfA2Kn_3nJwBdwHc-I9py_F9DwNYngo-66ZBvpYp9Obw. Acesso em: 10 set. 2025.

HOYER, Jacqueline; DICKHAUT, Wolfgang; KRONAWITTER, Lothar; WEBER, Björn. **Water Sensitive Urban Design: Principles and Inspiration for Sustainable Stormwater Management in the City of the Future**. Berlin: Jovis, 2011.

HUANG, Y.; BÁRDOSSY, A.; ZHANG, K. Sensitivity of hydrological models to temporal and spatial resolutions of rainfall data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, p. 2647-2663, 2019. Disponível em: https://hess.copernicus.org/articles/23/2647/2019/?utm_source=chatgpt.com Acesso em: 14 set. 2025.

HUANG, Yu et al. Application of pervious concrete pavement in the “breathe in-breathe out” design for sponge cities in China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 28, p. 40818–40837, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33760-6>. Acesso em: 16 mar. 2026.

HUNG, Marcelo Ng Wei Ban, SAMPAIO, Tony Vinicius Moreira; SCHULTZ, Gilson Bauer; SIEFERT, Cesar Augusto Crovador; LANGE, Daniel Ribeiro; MARANGON, Fernando Helmuth Syring; SANTOS, Irani dos. Levantamento com veículo aéreo não tripulado para geração de modelo digital do terreno em bacia experimental com vegetação florestal esparsa. **Revista Ra’e Ga**, Curitiba, v. 43, p. 93-109, 2018. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/58662>. Acesso em: 14 set. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Banco de dados

meteorológicos para ensino e pesquisa – BDMEP: dados históricos de temperatura do ar. Brasília: INMET, 2023. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br>. Acesso em: 17 dez. 2025.

INPE. CBERS – **Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2024. Disponível em: <http://www.inpe.br/cbers/>. Acesso em: 15 set. 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Uso da Terra**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População estimada de Belo Horizonte**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/belo-horizonte.html>. Acesso em: 20 maio 2025.

JARDIM, C.; SILVA, M. Extremos de temperatura do ar em Belo Horizonte: variabilidade natural e influência do clima urbano. **Revista do Departamento de Geografia da USP**, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 116–128, 2016. DOI: <https://doi.org/10.11606/rdg.v1i0.118036>. Acesso em: 5 dez. 2025.

KAWASHIMA, Renata Sayuri; GIRNAOTTI, Mariana Abrantes; ALMEIDA, Cláudia Maria; QUINTANILHA, José Alberto. Modelagem Dinâmica Espacial como ferramenta para simulação de cenários da paisagem na região portuária da Baixada Santista. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 4, p. 703-718, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bcg/a/bP7DF8qTQZJfc5sGs8PqY4x/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 15 set. 2025.

KOMISAR, June; NASH, Joe; GORANSON, Mark. **Carrot City: Creating Places for Urban Agriculture**. New York: Monacelli Press, 2011.

KOMISAR, June; NASR, Joe. Urban design for food systems. **Urban Design International**, v. 24, n. 2, p. 77–79, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1057/s41289-019-00094-x>. Acesso em: 29 set. 2025.

KONGJIAN YU. **Entrevista concedida ao programa Fantástico**. Rio de Janeiro: TV Globo, 22 set. 2024. Disponível em: <https://globoplay.globo.com/v/13968087>.

Acesso em: 28 set. 2025.

LABORATÓRIO DA PAISAGEM. Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais (EAUFMG). **Mapas do sistema de espaços livres e fringes belts de Belo Horizonte**. Belo Horizonte, 2008–2011. Disponível em: acervo institucional do Laboratório da Paisagem da EAUFMG. Acesso em: 17 dez. 2025.

LACERDA, Heitor Carvalho et al. Comparative evaluation of the vertical accuracy of digital elevation models derived from free global satellites. **Revista Espinhaço**, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.5095061>. Acesso em: 05 fev. 2026.

LI, Jin. A Critical Review of Spatial Predictive Modeling Process in Environmental Sciences with Reproducible Examples in R. **Applied Sciences**, v. 9, n. 10, 2048, 2019. Disponível em: https://www.mdpi.com/2076-3417/9/10/2048?utm_source=chatgpt.com Acesso em: 15 set. 2025.

LOPES, V. A. R. (2017). **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada de bacias e sistemas lagunares com influência do vento**. 2017. 215 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

MACEDO, Sílvio. **Quadro do Paisagismo no Brasil**. São Paulo: FAUUSP, 1999, p. 11. Disponível em: <https://www.fau.usp.br/>. Acesso em: 02 dez. 2025.

MACEDO, Silvio Soares. **Paisagem, litoral e formas de urbanização**. In: BRASIL. Ministério do Meio Ambiente; Ministério do Planejamento e Orçamento. Projeto Orla: subsídios para um projeto de gestão. Brasília: MMA e MPO, 2004. Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/190/_arquivos/projeto_orla_subsidios.pdf. Acesso em: 29 jul. 2025.

MACIEL, Marieta Cardoso; COSTA, Staël de Alvarenga Pereira; ALVARES, L. M. C. et al. Os espaços livres na paisagem de Belo Horizonte. **Paisagem e Ambiente: Ensaio**, São Paulo, n. 26, p. 51–72, 2009. Disponível em: acervo digital da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Acesso em: 17 dez. 2025.

MAGNOLI, Miranda M. E. M. **Espaços livres e urbanização**: uma introdução a

aspectos da paisagem metropolitana. 1982. Tese (Livre-docência) — Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1982. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/>. Acesso em: 02 dez. 2025.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas – Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. São Paulo: MapBiomas, 2024. Disponível em: <https://mapbiomas.org>. Acesso em: 24 mar. 2026.

McHARG, Ian L. **Design with Nature**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 1992.

MG2. **Moradores de bairros de BH reclamam que ‘jardins de chuva’ estão virando um problema**. MG2, GloboPlay, 2025. Disponível em: <https://globoplay.globo.com/v/12126347/>. Acesso em: 08 set. 2025.

MENDONÇA, T. N. M. de; MELO, A. B. de. Telhado verde modular extensivo: biodiversidade e adaptação das plantas aos Blocos TEVA. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 8, n. 2, p. 117-126, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/parc.v8i2.8649606>. Acesso em: 10 set. 2025.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR – GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2000.

MONTE-MÓR, Roberto Luís de Melo. Urbanização extensiva e novas fronteiras urbanas no Brasil. **Território: globalização e fragmentação**. São Paulo: Hucitec, 2003. p. 171–188.

MORAIS, Bárbara Roberta et al. Os telhados verdes nas políticas ambientais e como medida mitigadora das inundações urbanas: uma revisão sistemática. **Labor e Engenho**, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20396/labore.v15i00.8663910> Acesso em: 05/02/2026.

MORAIS, Bárbara Roberta. **Uso de técnicas de modelagem e análise espacial para avaliação do potencial de aplicação de infraestruturas verdes: estudo de caso da bacia hidrográfica do Córrego da Ressaca**. 2022. 106 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

MOURA, A. C. M. **Aplicações de modelos de mensuração de métricas de**

paisagem nos estudos da dinâmica de ocupação urbana no quadrilátero ferrífero e região metropolitana de Belo Horizonte – MG. 2010. Aracaju – SE. XXIV Congresso Brasileiro de Cartografia -, 2010. Disponível em: <https://www.geoproea.com.br/publicacoes/2010/aplicacoes-de-modelos-de-mensuracao-de-metricas-de-paisagem-nos-estudos-da-dinamica-de-ocupacao-urbana-no-quadrilatero-ferrifero-e-regiao-metropolitana-de-belo-horizonte-mg> Acesso em: 15 abr. 2024.

MOURA, Newton Celio Becker de. **Biorretenção:** tecnologia ambiental urbana para manejo das águas de chuva. 2014. Tese (Doutorado em Paisagem e Ambiente) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. doi:10.11606/T.16.2014.tde-30052014-104153. Acesso em: 02 dez. 2024.

MUÑOZ, Silvia Martín; ELLIOTT, Simon; SCHOELYNCK, Jonas; STAES, Jan. **Urban stormwater management using nature-based solutions:** a review and conceptual model of floodable parks. *Land*, v. 13, n. 11, p. 1858, 2024. Disponível em: <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/42ryeoW4>. Acesso em: 8 set. 2025.

NUNES, D. M. **Gestão das águas pluviais urbanas e elementos da infraestrutura verde:** estudo de caso da Bacia Hidrográfica do Rio Morto, Rio de Janeiro. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <http://www.bdtd.uerj.br/handle/1/XXXX>. Acesso em: 10 set. 2025.

NERO, M. A. et al. NA Assessment of the influence of DTM quality on dam rupture simulation processes. **MOJ Ecology & Environmental Sciences (MOJES)**, v. 9, n. 2, p. 61-70, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.15406/mojes.2024.09.00308>. Acesso em: 05 fev. 2026.

OLIVEIRA, M.; GANEM, K.; BAPTISTA, G. Análise sazonal da relação entre sequestro de carbono e ilhas de calor urbanas nas metrópoles de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 69, n. 1, p. 159–174, 2017. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44336/23418>. Acesso em: 5 jun. 2025.

ORLANDI, A. G. et al. Vertical accuracy assessment of the processed SRTM data for

the Brazilian territory. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 25, n. 4, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1982-21702019000400021>. Acesso em: 15 set. 2025.

OSMUNDSON, T. **Roof Gardens: History, Design and Construction**. New York: W. W. Norton & Company Inc., 1999.

PATARO, Adriano. **Dominando o Excel 2019**. São Paulo: Novatec Editora, 2019. Disponível em: <https://novatec.com.br/livros/dominando-excel-2019/>. Acesso em: 14 set. 2025.

PEDROSA, A. C. V.; FERNANDES, A. S. da C. Cidades esponja: estudo de caso aplicado no município do Rio de Janeiro. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, [S. l.], v. 17, n. 7, p. e8808, 2024. DOI: 10.55905/revconv.17n.7-387. Disponível em: <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/8808>. Acesso em: 3 fev. 2026.

PHIRI, D.; SIMWANDA, M.; SALEKIN, S.; NYIRENDA, V. R.; MURAYAMA, Y.; RANAGALAGE, M. Sentinel-2 data for land cover/use mapping: a review. **Remote Sensing**, v. 12, p. 2291, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12142291>. Acesso em: 27 abr. 2025.

QI, Y.; LI, Q.; LI, X. Addressing challenges of urban water management in Chinese sponge cities via nature-based solutions. **Water**, v. 12, n. 10, p. 2788, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w12102788>. Acesso em: 14 abr. 2025.

QGIS. QGIS versão “3.16.5 Hannover”. 2023. Disponível em: <https://qgis.org/en/site/forusers/alldownloads.html>. Acesso em: 05 fev. 2026.

RANI, Jyoti; YADAV, Shashiranj Kumar. Sustainable Urban Design and Management: The Role of BIM and GIS Integration. In: **Building Information Modeling and Geographic Information Systems for Next-Generation Spatial Intelligence**. IGI Global Scientific Publishing, 2026. p. 169-208. Disponível em: <https://doi.org/10.4018/979-8-3373-4058-6.ch007> Acesso em: 05 fev. 2025.

RAO, Y. et al. Quality assessment of TanDEM-X DEMs using airborne LiDAR, photogrammetry and ICESat elevation data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 2, n. 8, p. 187–192, 2014. Disponível em:

<https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-8-187-2014> Acesso em: 14 set. 2025.

RAZZAGHMANESH, M.; BEECHAM, S.; SALEMI, T. The role of green roofs in mitigating urban heat island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. **Urban Forestry & Urban Greening**, Amsterdam, v. 14, n. 4, p. 1004–1013, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866715000785>. Acesso em: 17 dez. 2025.

REIS, Patrícia Elizamma; PARIZZI, Maria Giovana; MAGALHÃES, Danilo Marques de; MOURA, Ana Clara Mourão. **O escoamento superficial como condicionante de inundações em belo horizonte, MG**: Estudo de caso da sub-bacia córrego do leitão, Bacia do Ribeirão Arrudas. 2012. 148 fl. 2012. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/MPBB8JAJ8X/1/disserta__o_completa___i_mpress_o.pdf Acesso em: 08 abr. 2024.

RICCI, Larissa; VASCONCELOS, André. **Chuva em BH**: após enchente na barragem Santa Lúcia, carros ‘amontoados’ são retirados e vias são liberadas. Itatiaia, 24 jan. 2024. Disponível em: <https://www.itatiaia.com.br/cidades/2024/01/24/enchente-na-barragem-santa-lucia-em-bh-carros-amontoados-sao-retirados-e-vias-sao-liberadas>. Acesso em: 10 set. 2025.

RICHTER, Michael et al. Trees in sponge cities—A systematic review of trees as a component of blue-green infrastructure, vegetation engineering principles, and stormwater management. **Water**, v. 16, n. 5, p. 655, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w16050655>. Acesso em: 16 mar. 2026.

RODRIGUES, T. G.; PARADELLA, W. R.; OLIVEIRA, C. G. Evaluation of the altimetry from SRTM-3 and planimetry from high-resolution PALSAR FBD data for semi-detailed topographic mapping in the Amazon Region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 83, n. 3, p. 953–966, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0001-37652011000300014> Acesso em: 15 set. 2025.

SALES, Eduardo Henrique Souza et al. Análise espacial das áreas verdes de Belo

Horizonte e sua relação com a qualidade de vida. **Revista Contemporânea**, v. 5, n. 6, p. e8332, 2025. Disponível em: <https://ojs.revistacontemporanea.com/ojs/index.php/home/article/view/8332>. Acesso em: 11 ago. 2025.

SAMPAIO, Andréa Alves Sampaio; AZEVEDO, Kátia Regina de Souza; COSTA, Carolina Maria Nascimento; SANTOS, Paulo Luiz dos. Uma introdução aos delineamentos experimentais de sujeito único. **Interação em Psicologia**, Curitiba, v. 12, n. 1, p. 151-164, 2008. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/psicologia/article/view/9537>. Acesso em: 20 set. 2025.

SANTANA, Sheyla Aguilár de. **Geoprocessamento na modelagem parametrizada da paisagem territorial**: Aplicações da geovisualização na simulação da paisagem urbana. 2014. 244 f. 2014. Tese de Doutorado - Programa de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-9KPHUK> Acesso em: 28 out. 2023.

SANTOS, Alex da Silva. **Introdução ao ambiente SIG QGIS**. 2018. 144 f. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. 2018. Disponível em: chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/outros_documentos_tecnicos/introducao_sig_qgis/Introducao_ao_ambiente_SIG_QGIS_2edicao.pdf Acesso em: 10 set. 2025.

SANTOS, Tierre de Almeida dos; SILVA, Joecila Santos da; SOUZA, José Camilo Ramos de. **Uma proposta de renaturalização de várzea urbanizada em Parintins (AM)**. **ARACÊ**, v. 7, n. 6, p. 30520-30534, 2025. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/5739>. Acesso em: 11 ago. 2025.

SHANG, Yuchang et al. Low-carbon layout optimization and scheme comparison of LID facilities in arid regions based on NSGA-III. **Water**, v. 18, n. 1, p. 50, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w18010050>. Acesso em: 16 mar. 2026.

SILVA, Edward Rodrigues da. Arrudas Em Minas Gerais – Miguel De Souza Arruda. **Revista da ASBRAP**, N.º. 21, P. 637-796. 2014. Disponível em: https://asbrap.org.br/artigos/rev21_art11.pdf Acesso: 20 abr. 2024.

SPINK, Ana Clara. **O jardim de concreto**: um estudo sobre a apropriação de espaços livres públicos em áreas urbanas consolidadas. 2006. 216 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SOAREAS-FILHO, Britaldo Silveira. **Análise de paisagem**: Fragmentação e mudança. Belo Horizonte, FMG, Departamento de Geografia, Centro de Sensoriamento Remoto, 90p, 1998.

SOUSA, Ícaro Viterbre Debique; SOUSA, Heron Viterbre Debique; JUNIOR, Antonio Mendes Magalhães; NUNES, Pedro Henrique; FARIA, Igor Luis de Castro; FARIA, Aliff Junio de Castro. Os benefícios do telhado verde e a sua utilização pela construção civil. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, V. 13, Nº. 2 12 fl. 2021. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/download/17679/209209214426/209209236485> Acesso em: 15 mai. 2024.

SOUSA, Fernando José de. A poluição nos ribeirões Arrudas, Onça e Isidoro. **Água, Vida & Cia**, 25 out. 2017. Disponível em: <https://ferdinandodesousa.com/2017/10/25/a-poluicao-nos-ribeiroes-arrudas-onca-e-isidoro/>. Acesso em: 20 set. 2025.

SOUZA, Talita Silvia de. **Estudo de Tecnologias em Sponge City para Drenagem da Água Pluvial** – Aplicação no Rio Arrudas em BH. 2020. 78 fl. 2020. Monografia – Programa de Especialização em Sistemas tecnológicos e Sustentabilidade Aplicados ao Ambiente Construído da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/37963> Acesso em: 10 abr. 2021.

SOUZA, Giulia Yasmin Ferreira de. **Biovaletas**: infraestrutura verde sustentável. 2022. 34 fl. 2022. Monografia - Departamento de Ciências Exatas e Naturais Curso Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2022. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/5702d34e-b425-4853-91af-c9f15b74dc6b/content> Acesso em: 15 maio 2021.

SOUZA, T. S. de; COSTA, S. de Alvarenga Pereira; GIMMLER NETTO, M. M. Cidades esponjas: aplicabilidade de soluções sustentáveis no Ribeirão Arrudas, em Belo Horizonte-MG. **Desafios** – Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins, Palmas, v. 12, n. 2, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.20873/2025_ENEPEA_v12n2.08. Acesso em: 15 jul. 2025.

TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo; MØLLER, Ian Max; MURPHY, Angus. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TEIXEIRA, Óscar Ciríaco. **SIG: sistemas de informação geográfica**. Porto: Universidade do Porto, 1993.

TEIXEIRA, B. K.; SILVA, A. de S. Tipos de vegetação para medidas compensatórias de controle pluvial na fonte em zonas subtropicais. **LABVERDE**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 103–127, 2019.

TERINK, W.; LUTZ, A. F.; SIMONS, G. W. H.; IMMERZEEL, W. W.; DROOGERS, P. SPHY v2.0: Spatial Processes in HYdrology. **Geoscientific Model Development**, v. 8, p. 2009-2015, 2015. Disponível em: https://gmd.copernicus.org/articles/8/2009/2015/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 16 set. 2025.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Brasília: Ministério das Cidades, 2008.

USACE-US Army Corps of Engineers. **HEC-FDA Flood Damage Reduction Analysis User's Manual Version 1.4.1**. Davis, CA: US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. 2016. Disponível em: https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-fda/documentation/CPD-72_V1.4.1.pdf. Acesso em: 05 fev. 2026.

USACE-US Army Corps of Engineers. **HEC-FIA User's Manual Version 3.4**. Davis, CA: US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. 2024a. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/fiadocs/fiaum/latest>. Acesso em: 05 fev. 2026.

USACE-US Army Corps of Engineers. **HEC-HMS User's Manual Version 4.12**. Davis, CA: US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Hydrologic

Engineering Center. 2024b. Disponível em:
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/latest>. Acesso em: 10 dez. 2024. USACE-US Army Corps of Engineers. **HEC-RAS Mapper User's Manual**. Davis, CA: US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. 2024c. Disponível em:
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rmum/latest>. Acesso em: 05 fev. 2026.

USACE-US Army Corps of Engineers. **HEC-RAS river analysis system 2D modeling user's manual Version 6.4.1**. Davis, CA: US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. 2023. Disponível em:
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%20User's%20Manual-v6.4.1.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2026.

USACE-US Army Corps of Engineers. **HEC-ResSim User's Manual Version 3.5**. Davis, CA: US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. 2024d. Disponível em:
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/ResSimDocs/rsum>. Acesso em: 05 fev. 2026.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS Hydraulic Reference Manual**. Davis, CA: Hydrologic Engineering Center, 2025. Disponível em:
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/latest/basic-data-requirements/geometric-data/energy-loss-coefficients>. Acesso em: 14 abr. 2025.

VESTENA, Leandro Redin. A importância da hidrologia na prevenção e mitigação de desastres naturais. 2008. **Revista Ambientia** - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais, v. 4 n. 1 Jan./Abr. 2008.

VIJAYARAGHAVAN, K. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 740-752, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>. Acesso em: 28 ago. 2025.

VILLELA, Swami M. Marcondes; MATTOS, Arthur. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975. 245p.

WAN, P.; ZHANG, H. Enhancing urban water ecological resilience through sponge city initiatives: Evidence from China. **Urban Climate**, v. 65, p. 102755, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102755> Acesso em: 03 fev. 2026.

WECHSLER, S. P. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1481–1500, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1481-2007> Acesso em: 30 ago. 2025.

YIN, Dingkun; CHEN, Ye; JIA, Haifeng; WANG, Qi; CHEN, Zhengxia; XU, Changqing; LI, Qian; WANG, Wenliang; YANG, Ye; FU, Guangtao; CHEN, Albert S. Sponge city practice in China: A review of construction, assessment, operational and maintenance. **Science Direct**, 17 fl. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620350071> Acesso em: 30 mar. 2024.

YU, Kongjian et al. “Sponge city”: Theory and practice. **City Planning Review**, v. 39, n. 6, p. 26-36, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620350071> Acesso em: 05 fev. 2026.

ZENG, Liyun; ZENG, Huiling; SONG, Lingxi. Perception of sponge city for achieving circularity goal and hedge against climate change: a study on Weibo. **Preprints / vLex International Law**, 2023. Disponível em: <https://international.vlex.com/vid/perception-of-sponge-city-1072315099>. Acesso em: 10 ago. 2025.

ZHOU, Jinjun; LIU, Jiahong; SHAO, Weiwei; YU, Yingdong; ZHANG, Kun; Wang, Ying; MEI, Chao. Effective Evaluation of Infiltration and Storage Measures in Sponge City Construction: A Case Study of Fenghuang City. **Water**, 11fl. 2018. Disponível em: https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php?option=com_pmetabusca&mn=88&smn=88&type=m&metalib=aHR0cHM6Ly9ybnAtcHJpbW8uaG9zdGVkLmV4bGlicmlzZ3JvdXAuY29tL3ByaW1vX2xpYnJhcnkvbGlid2ViL2FjdGlubi9zZWYyZGUZG8/dmlkPUNBUEVTX1Yx&Itemid=124. Acesso em: 11 jun. 2020.

ZHU, Yifei et al. Utilizing multi-objective optimization in improved green infrastructure for enhanced pollution reduction and carbon mitigation in sponge cities. **Resources**,

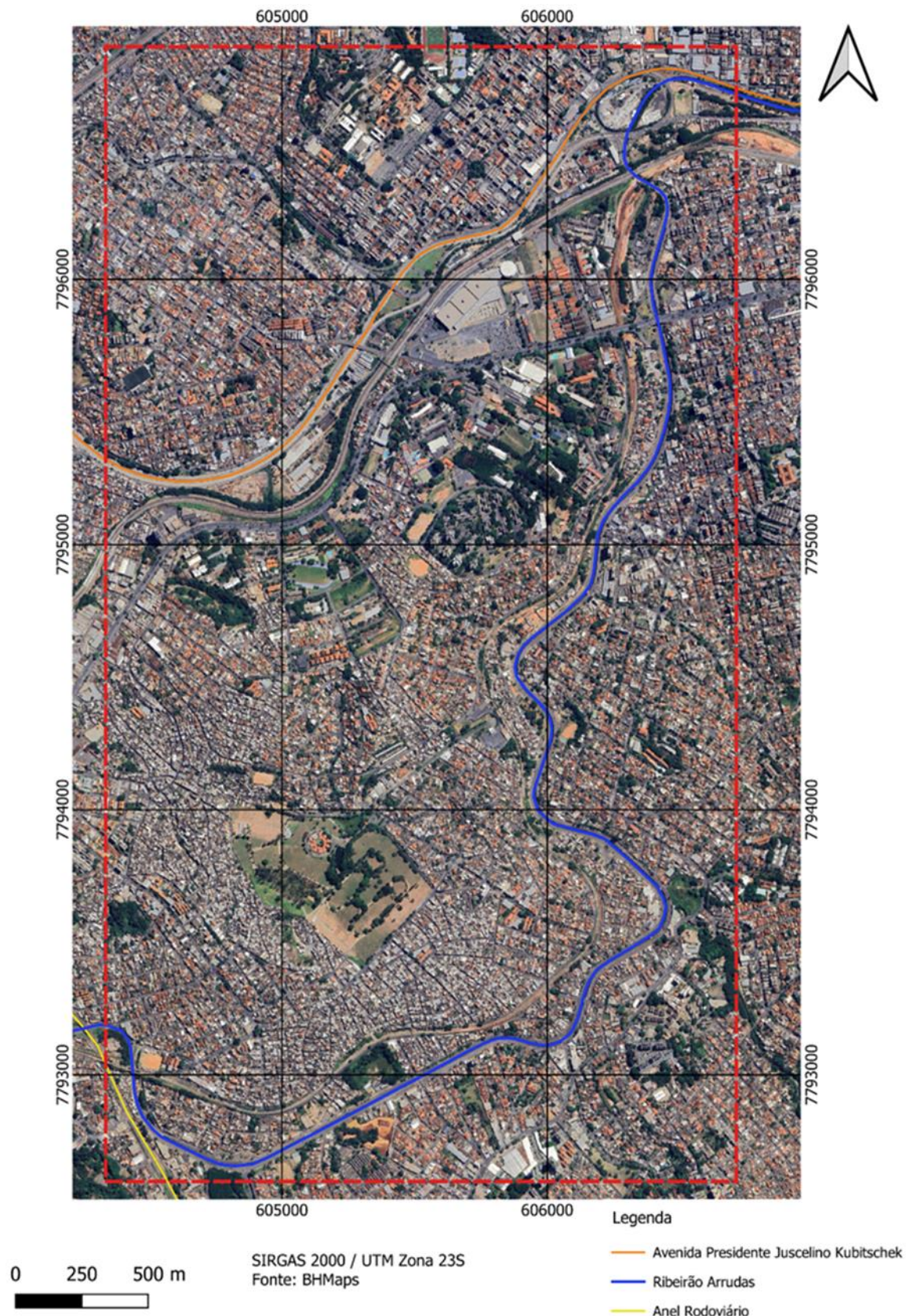
Conservation and Recycling, v. 217, p. 108179, 2025. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344925000588>. Acesso em:

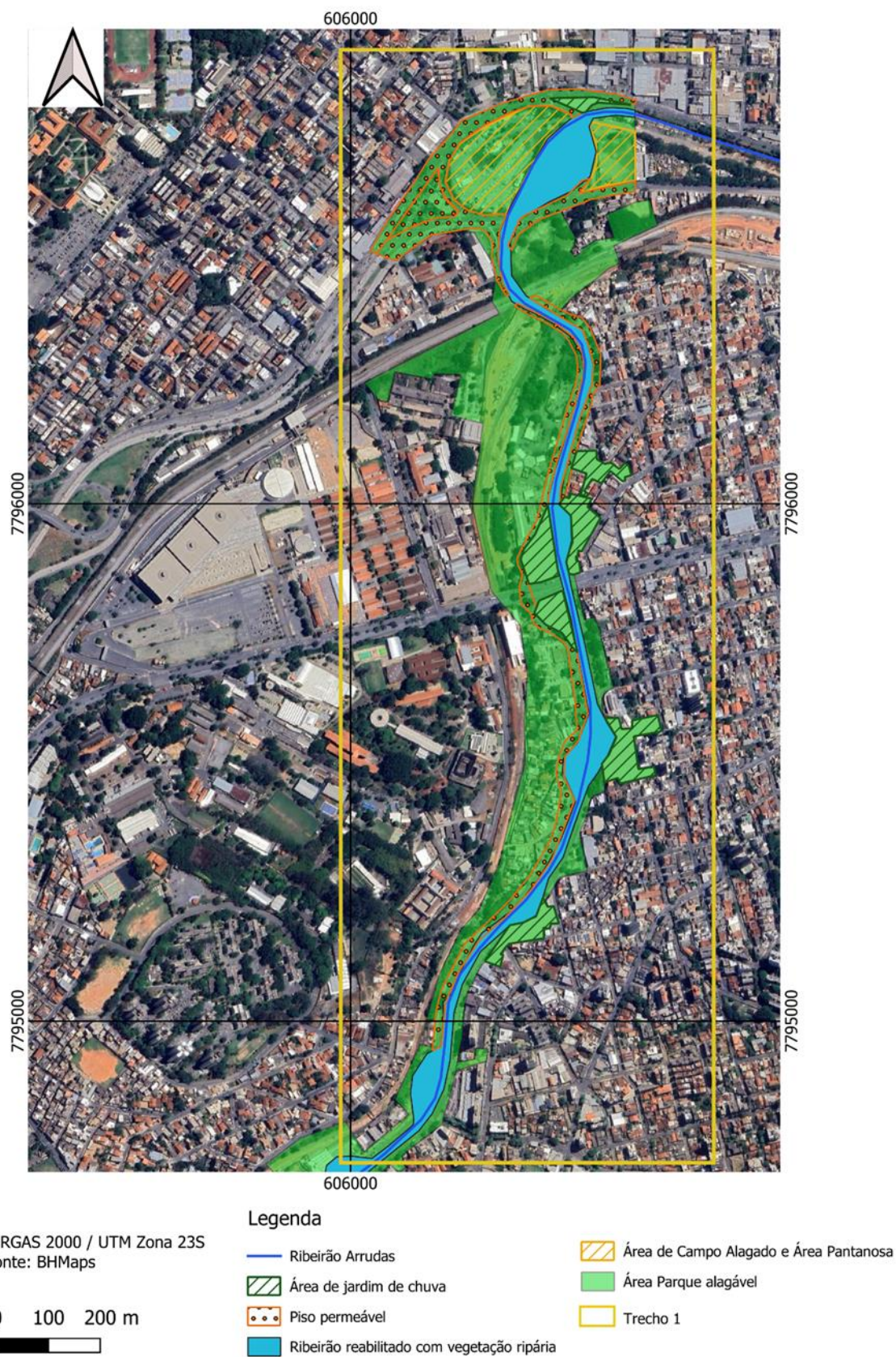
11 ago. 2025.

APÊNDICES

Localização da área de estudo Ribeirão Arrudas – Avenida Teresa Cristina



Mapeamento da proposta de áreas para a implantação das soluções de infraestrutura verde – Trecho 1



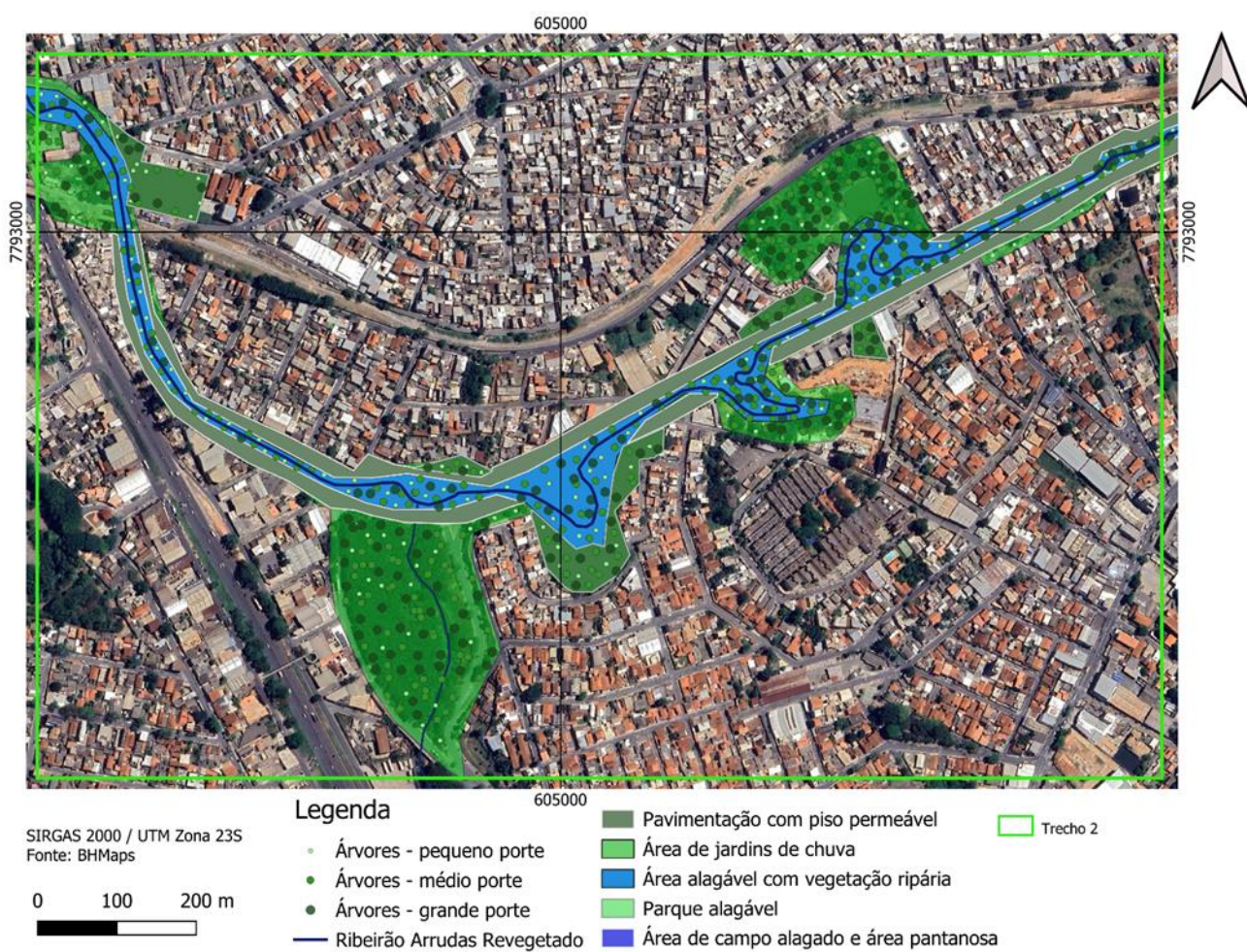
Mapeamento da proposta de áreas para a implantação das soluções de infraestrutura verde – Trecho 2



Proposta de implantação de um Parque Esponja Alagável – Trecho 1



Proposta de implantação de um Parque Esponja Alagável – Trecho 2



ANEXOS

Tabela Coleção 9 do MapBiomas Brasil utilizada nas simulações

|  MAPBIOMAS | | Códigos das classes da legenda da Coleção 9 do MapBiomas Brasil | | |
|--|---|---|-----------------|----------|
| COLEÇÃO 9 - CLASSES | COLLECTION 9 - CLASSES | Code ID | Hexacode Number | Color ID |
| 1. Floresta | 1. Forest | 1 | #1f8d49 | |
| 1.1 Formação Florestal | 1.1. Forest Formation | 3 | #1f8d49 | |
| 1.2. Formação Savânica | 1.2. Savanna Formation | 4 | #7dc975 | |
| 1.3. Mangue | 1.3. Mangrove | 5 | #04381d | |
| 1.4. Floresta Alagável | 1.4. Floodable Forest | 6 | #026975 | |
| 1.5. Restinga Arbórea | 1.5. Wooded Sandbank Vegetation | 49 | #02d659 | |
| 2. Vegetação Herbácea e Arbustiva | 2. Herbaceous and Shrubby Vegetation | 10 | #ad975a | |
| 2.1. Campo Alagado e Área Pantanosa | 2.1. Wetland | 11 | #519799 | |
| 2.2. Formação Campestre | 2.2. Grassland | 12 | #d6bc74 | |
| 2.3. Apicum | 2.3. Hypersaline Tidal Flat | 32 | #fc8114 | |
| 2.4. Afloramento Rochoso | 2.4. Rocky Outcrop | 29 | #ffaa5f | |
| 2.5. Restinga Herbácea | 2.5. Herbaceous Sandbank Vegetation | 50 | #ad5100 | |
| 3. Agropecuária | 3. Farming | 14 | #FFFFB2 | |
| 3.1. Pastagem | 3.1. Pasture | 15 | #edde8e | |
| 3.2. Agricultura | 3.2. Agriculture | 18 | #E974ED | |
| 3.2.1. Lavoura Temporária | 3.2.1. Temporary Crop | 19 | #C27BA0 | |
| 3.2.1.1. Soja | 3.2.1.1. Soybean | 39 | #f5b3c8 | |
| 3.2.1.2. Cana | 3.2.1.2. Sugar cane | 20 | #db7093 | |
| 3.2.1.3. Arroz | 3.2.1.3. Rice | 40 | #c71585 | |
| 3.2.1.4. Algodão (beta) | 3.2.1.4. Cotton (beta) | 62 | #ff69b4 | |
| 3.2.1.5. Outras Lavouras Temporárias | 3.2.1.5. Other Temporary Crops | 41 | #f54ca9 | |
| 3.2.2. Lavoura Perene | 3.2.2. Perennial Crop | 36 | #d082de | |
| 3.2.2.1. Café | 3.2.2.1. Coffee | 46 | #d68fe2 | |
| 3.2.2.2. Citrus | 3.2.2.2. Citrus | 47 | #9932cc | |
| 3.2.2.3. Dendê | 3.2.2.3. Palm Oil | 35 | #9065d0 | |
| 3.2.2.4. Outras Lavouras Perenes | 3.2.2.4. Other Perennial Crops | 48 | #e6ccff | |
| 3.3. Silvicultura | 3.3. Forest Plantation | 9 | #7a5900 | |
| 3.4. Mosaico de Usos | 3.4. Mosaic of Uses | 21 | #ffefc3 | |
| 4. Área não Vegetada | 4. Non vegetated area | 22 | #d4271e | |
| 4.1. Praia, Duna e Areal | 4.1. Beach, Dune and Sand Spot | 23 | #ffa07a | |
| 4.2. Área Urbanizada | 4.2. Urban Area | 24 | #d4271e | |
| 4.3. Mineração | 4.3. Mining | 30 | #9c0027 | |
| 4.4. Outras Áreas não Vegetadas | 4.4. Other non Vegetated Areas | 25 | #db4d4f | |
| 5. Corpo D'água | 5. Water | 26 | #0000FF | |
| 5.1 Rio, Lago e Oceano | 5.1. River, Lake and Ocean | 33 | #2532e4 | |
| 5.2 Aquicultura | 5.2. Aquaculture | 31 | #091077 | |
| 6. Não observado | 6. Not Observed | 27 | #ffffff | |