



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA URBANA**



Luis Felipe Figueiredo Mafra

Dinâmica de áreas urbanas inundáveis na sub-bacia do rio
Carinhanha, bacia hidrográfica do rio São Francisco

Ouro Preto

2026

Luis Felipe Figueiredo Mafra

Dinâmica de áreas urbanas inundáveis na sub-bacia do rio
Carinhanha, bacia hidrográfica do rio São Francisco

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Urbana da Universidade
Federal de Ouro Preto como requisito parcial
para obtenção do título de Engenheiro
Urbanista.

Orientador: Dr. Múcio A. dos S. A. Mendes

Coorientadora: Dra. Tamara D. de Souza

Data da aprovação: 27/02/2026

Ouro Preto

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M187d Mafra, Luis Felipe Figueiredo.
Dinâmica de áreas urbanas inundáveis na sub-bacia do rio Carinhanha, bacia hidrográfica do rio São Francisco. [manuscrito] / Luis Felipe Figueiredo Mafra. - 2026.
85 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Múcio André dos Santos Alves Mendes.
Coorientador: Prof. Dr. Tamara Daiane de Souza.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Urbana .

1. Planejamento urbano. 2. Hidrologia urbana. 3. Gestão de riscos. I. Mendes, Múcio André dos Santos Alves. II. de Souza, Tamara Daiane. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 62:711.4

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - CRB6/2322



FOLHA DE APROVAÇÃO

Luis Felipe Figueiredo Mafra

Dinâmica de áreas inundáveis em área urbana na sub-bacia do rio Carinhonha, bacia hidrográfica do Rio São Francisco

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Urbanista

Aprovada em 27 de fevereiro de 2026

Membros da banca

Dr. Múcio André dos Santos Alves Mendes - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Tamara Daiane de Souza - Coorientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Me. Isabela da Silva Pedro Rochinha - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Maria Luiza Teófilo Gandini- Universidade Federal de Ouro Preto

Múcio André dos Santos Alves Mendes , orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 28/02/20206



Documento assinado eletronicamente por **Múcio André dos Santos Alves Mendes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/03/2026, às 12:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **1068864** e o código CRC **E685D8F5**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Anderson e Cicinha, por serem minha base em todos os momentos da vida. Obrigado pelo apoio incondicional, pelos ensinamentos e por nunca medirem esforços para que eu pudesse chegar até aqui. Cada conquista minha carrega um pouco de vocês. Se hoje concluo mais essa etapa, é porque sempre tive o amor, a confiança e o incentivo de vocês.

Registro minha gratidão à equipe e aos professores do Laboratório de Saneamento da UFOP, que tiveram papel fundamental na minha formação acadêmica e profissional, em especial, Isabela e Aníbal. Além disso, agradeço a todos que contribuíram com ensinamentos, orientação e experiências que despertaram e fortaleceram meu interesse pela área de recursos hídricos e saneamento.

Aos professores do curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto, agradeço pelo ensino de qualidade e pela dedicação à formação técnica e humana dos alunos. À UFOP, minha gratidão por proporcionar um ambiente de aprendizado, crescimento e oportunidades que marcaram profundamente minha trajetória.

De forma especial, agradeço ao meu orientador Múcio pela confiança, pelos ensinamentos, pela disponibilidade e pela condução segura deste trabalho. À Tamara, minha sincera gratidão pela coorientação, pelas contribuições técnicas e pelo apoio durante o desenvolvimento da pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para que esta etapa fosse concluída. Cada apoio, palavra de incentivo e oportunidade foram essenciais para a realização deste trabalho.

RESUMO

A ocupação de áreas próximas aos cursos d'água tem ampliado a exposição da população aos riscos associados a eventos extremos de cheia. No município de Juvenília – MG, o trecho urbano do rio Carinhanha apresenta suscetibilidade a inundações durante períodos de elevada vazão, tornando necessária a delimitação das áreas potencialmente atingidas. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo estimar vazões de projeto associadas a diferentes tempos de retorno e delimitar as manchas de inundação no trecho urbano do rio Carinhanha, a fim de subsidiar o planejamento territorial e a gestão de riscos hidrológicos do município. Para isso, foi realizada a análise de frequência das vazões máximas anuais registradas na estação fluviométrica Juvenília (45260000), considerando uma série histórica composta por 60 anos de dados válidos. A partir dessa série, foram estimadas as vazões de projeto correspondentes aos tempos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos, as quais foram utilizadas como condição de contorno em um modelo hidrodinâmico unidimensional desenvolvido no software HEC-RAS. A modelagem hidráulica foi realizada a partir da definição da geometria do canal e das planícies de inundação, permitindo simular os perfis de escoamento e os níveis d'água ao longo do trecho analisado e, conseqüentemente, a delimitação das áreas potencialmente inundáveis para cada cenário hidrológico. Os resultados indicaram a elevação progressiva dos níveis d'água e a expansão da mancha de inundação com o aumento do tempo de retorno, atingindo áreas urbanizadas situadas próximas ao leito do rio e evidenciando a presença de zonas suscetíveis a eventos de cheia. Os mapas de inundação gerados constituem uma importante ferramenta para o planejamento urbano e para a gestão de riscos hidrológicos, contribuindo para a adoção de medidas preventivas e estratégias de mitigação de impactos associados a eventos hidrológicos extremos.

Palavras-chaves: HEC-RAS; Modelagem hidráulica; Mancha de inundação.

ABSTRACT

The occupation of areas close to watercourses has increased the population's exposure to risks associated with extreme flood events. In the municipality of Juvenília, Minas Gerais, Brazil, the urban stretch of the Carinhanha River is susceptible to flooding during periods of high discharge, making it necessary to delimit the areas potentially affected. In this context, the present study aimed to estimate design discharges associated with different return periods and to delineate flood inundation maps in the urban stretch of the Carinhanha River in order to support territorial planning and hydrological risk management in the municipality. For this purpose, a frequency analysis of the annual maximum discharges recorded at the Juvenília streamflow gauging station (45260000) was carried out, considering a historical series composed of 60 years of valid data. Based on this series, design discharges corresponding to return periods of 2, 5, 10, 50, and 100 years were estimated and used as boundary conditions in a one-dimensional hydrodynamic model developed using the HEC-RAS software. The hydraulic modeling was performed based on the definition of channel geometry and floodplain areas, allowing the simulation of water surface profiles and water levels along the analyzed reach and, consequently, the delineation of flood-prone areas for each hydrological scenario. The results indicated a progressive increase in water levels and expansion of the flood extent with increasing return periods, reaching urbanized areas located near the river channel and highlighting zones susceptible to flood events. The generated flood maps constitute an important tool for urban planning and hydrological risk management, contributing to the adoption of preventive measures and mitigation strategies for impacts associated with extreme hydrological events.

Keywords: HEC-RAS; floodplain mapping; hydraulic modeling.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Mapa de localização da estação selecionada | 18 |
| Figura 2 - Mapa de localização geográfica da sub-bacia do rio Carinhanha | 29 |
| Figura 3 - Mapa hidrográfico da sub-bacia do rio Carinhanha | 30 |
| Figura 4 - Mapa altimétrico da sub-bacia do rio Carinhanha | 31 |
| Figura 5 - Mapa de declividade da sub-bacia do rio Carinhanha..... | 32 |
| Figura 6 - Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do rio Carinhanha..... | 33 |
| Figura 7 - Mapa dos biomas presentes na sub-bacia do rio Carinhanha | 34 |
| Figura 8 - Tipos de solos presentes na sub-bacia do rio Carinhanha | 36 |
| Figura 9 - Geodiversidade da área de estudo..... | 37 |
| Figura 10 - Trecho escolhido para modelagem | 39 |
| Figura 11 - Mapa altimétrico do trecho estudado (sem batimetria incorporada)..... | 43 |
| Figura 12 - Batimetria real obtida da estação fluviométrica..... | 44 |
| Figura 13 - Batimetria da seção 1647 corrigida..... | 45 |
| Figura 14 - Seção transversal 1647 completa | 46 |
| Figura 15 - Mapa de uso e ocupação do solo do trecho estudado..... | 47 |
| Figura 16 - Perfis longitudinais do nível d'água simulados para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos ao longo do trecho estudado (sentido jusante–montante)..... | 52 |
| Figura 17 - Perfis longitudinais da velocidade média no canal principal para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos (sentido jusante–montante)..... | 53 |
| Figura 18 - Perfis longitudinais do número de Froude no canal principal para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos (sentido jusante–montante)..... | 54 |
| Figura 19 - Localização da seção transversal representativa no trecho estudado | 56 |
| Figura 20 - Seção transversal representativa com os níveis d'água simulados para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos | 57 |
| Figura 21 - Mancha de inundação simulada para TR2..... | 60 |
| Figura 22 - Mancha de inundação simulada para TR5..... | 61 |
| Figura 23 - Mancha de inundação simulada para TR10..... | 62 |
| Figura 24 - Mancha de inundação simulada para TR50..... | 63 |
| Figura 25 - Mancha de inundação simulada para TR100..... | 64 |
| Figura 26 - Detalhamento da mancha de inundação no cenário TR100..... | 65 |
| Figura 27 - Imagem histórica evidenciando áreas inundadas no trecho de estudo do rio Carinhanha...68 | |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Dados da estação fluviométrica selecionada..... | 18 |
| Tabela 2 - Valores para obtenção do coeficiente de Manning equivalente | 23 |
| Tabela 3 - Síntese dos testes de ajuste e decisão final por distribuição probabilística..... | 41 |
| Tabela 4 - Comparação das vazões estimadas pelas distribuições Log-Pearson tipo III e GEV | 42 |
| Tabela 5 - Coeficiente de Mannig para cada seção transversal | 50 |
| Tabela 6 - Cotas máximas do nível d'água simuladas para diferentes tempos de retorno para a seção representada..... | 58 |
| Tabela 7 - Comparação entre cota simulada e cota real observada para o evento de 12/08/2019 | 66 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. Objetivo..... | 3 |
| 1.1.1. Objetivos Específicos | 3 |
| 1.2. Justificativa..... | 4 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 6 |
| 2.1. A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: Contexto e Funções | 6 |
| 2.2. A Sub-bacia do Rio Carinhanha: Aspectos Físicos, Climáticos e Socioambientais | 7 |
| 2.3. Período de Cheias: Inundações e seus Impactos | 8 |
| 2.4. Uso de Geoprocessamento na Análise Hidrológica e no Mapeamento de Áreas Inundáveis..... | 9 |
| 2.5. Obtenção e Tratamento de Dados Hidrológicos | 11 |
| 2.6. Modelagem Hidrológica com HEC-RAS: Aplicações e Potencialidades | 12 |
| 2.7. Planejamento Urbano e Gestão de Riscos Hidrológicos | 14 |
| 3. METODOLOGIA..... | 16 |
| 3.1. Caracterização da Sub-bacia do rio Carinhanha | 16 |
| 3.2. Determinação do Trecho para a Modelagem..... | 16 |
| 3.3. Modelagem hidráulica..... | 17 |
| 3.3.1. Análise de Frequência de Vazões e Estimativa das Vazões de Projeto..... | 17 |
| 3.3.2. Geometria do Canal..... | 19 |
| 3.3.3. Coeficiente de rugosidade de Manning | 22 |
| 3.3.4. Definição das condições de contorno hidráulicas no HEC-RAS | 25 |
| 3.4. Validação do Modelo | 26 |
| 4. RESULTADOS | 28 |
| 4.1. Caracterização da Sub-bacia..... | 28 |
| 4.1.1. Localização geográfica | 28 |
| 4.1.2. Características hidrológicas | 29 |
| 4.1.3. Características do relevo..... | 30 |
| 4.1.4. Uso e ocupação do solo | 32 |
| 4.1.5. Tipos de solos | 35 |
| 4.1.6. Geologia | 36 |
| 4.2. Escolha do Trecho de Estudo | 37 |
| 4.3. Etapas da Modelagem Hidráulica | 39 |
| 4.3.1. Análise de Frequência das Vazões e Definição da Estação Fluviométrica..... | 39 |
| 4.3.2. Geométrica do Canal e da Planície de Inundação | 42 |
| 4.3.3. Definição do Coeficiente de Rugosidade de Manning | 46 |
| 4.3.4. Condições de Contorno Hidráulicas Adotadas no Modelo..... | 51 |
| 4.4. Resultados das Simulações..... | 51 |
| 4.4.1. Perfis Longitudinais do Nível d'Água..... | 51 |
| 4.4.2. Mapeamento das Áreas Inundáveis e Implicações para o Planejamento Urbano .. | 54 |
| 4.5. Resultados da Validação do Modelo..... | 65 |
| 5. CONCLUSÃO | 69 |
| REFERÊNCIAS | 71 |

1. INTRODUÇÃO

O rio São Francisco representa um dos sistemas hidrográficos mais estratégicos do território brasileiro, tanto por sua extensão quanto pela diversidade ambiental e socioeconômica que abrange. Seu percurso, iniciado na Serra da Canastra, em Minas Gerais, e finalizado no Oceano Atlântico, entre os estados de Alagoas e Sergipe, atravessa diferentes paisagens e climas, conectando as regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste do país (CBHSF, 2024). Considerado um dos mais importantes cursos d'água do Brasil, o rio é subdividido em quatro regiões fisiográficas (Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco) e conta com uma complexa rede hidrográfica composta por 36 afluentes principais, dos quais 19 são perenes (Pereira et al., 2007). Pereira et al., (2007) também afirmam que, entre os anos de 1950 e 1976, esses afluentes foram responsáveis por aproximadamente 81% da vazão total do rio, evidenciando sua importância para a manutenção do regime hidrológico da bacia. Além de sua relevância ambiental, o São Francisco sustenta atividades econômicas fundamentais, como irrigação para agricultura, abastecimento urbano, pesca, transporte fluvial e geração de energia elétrica (CBHSF, 2020).

Entre esses afluentes, destaca-se o rio Carinhanha, localizado na margem esquerda do curso médio do São Francisco. Com uma área de drenagem de aproximadamente 17 mil quilômetros quadrados, sua sub-bacia se estende pelos estados da Bahia e de Minas Gerais, abrangendo municípios como Carinhanha, Cocos, Coribe e Feira da Mata, na Bahia, e Formoso, Bonito de Minas, Chapada Gaúcha, Cônego Marinho, Januária, Juvenília e Montalvânia, em Minas Gerais (Vasconcelos et al., 2011). O Carinhanha desempenha papel estratégico na dinâmica hidrológica regional, contribuindo com cerca de 20% da perenidade do São Francisco, fator essencial para a estabilidade das vazões e a qualidade da água, sobretudo em contextos de variabilidade climática (Silveira, 2015). Nas proximidades de sua foz, encontram-se sistemas de lagoas marginais que desempenham funções ecológicas importantes e que, em períodos de cheia, podem estabelecer conectividade hidrológica temporária com o canal principal (Vasconcelos et al., 2011).

A sub-bacia do rio Carinhanha, encontra-se em uma região caracterizada por forte sazonalidade climática, com chuvas concentradas entre os meses de novembro e março, seguidas por longos períodos de estiagem (Salgueiro et al., 2021). Essa alternância no regime pluviométrico influencia diretamente o comportamento hidrológico dos cursos d'água regionais, refletindo-se em variações significativas dos níveis e das vazões ao longo do ano

(Collischonn et al., 2021). Eventos de cheia registrados em anos recentes, como os ocorridos no final de 2021 e início de 2022, provocaram elevação expressiva dos níveis do rio Carinhanha, resultando em inundações que afetaram áreas urbanas e rurais de municípios ribeirinhos da região. Nessas situações, o transbordamento do rio comprometeu o acesso a comunidades, causou o isolamento temporário de moradores e evidenciou a vulnerabilidade das ocupações situadas em áreas próximas à calha fluvial, reforçando a necessidade de estudos voltados à delimitação de manchas de inundação e ao planejamento territorial em áreas suscetíveis a eventos hidrológicos extremos (CORREIO24HORAS, 2022).

Os impactos associados a esses eventos extremos vão além das perdas materiais, podendo ocorrer também perdas humanas. Durante o período chuvoso, o transbordamento dos rios compromete o acesso a comunidades, afeta a mobilidade urbana, dificulta o abastecimento e impõe desafios significativos à gestão do território. A elevação dos níveis d'água e o extravasamento da calha reduzem a capacidade de resposta das infraestruturas urbanas, especialmente em municípios de pequeno porte, onde a ocupação das margens ocorre, em muitos casos, sem adequado planejamento territorial. Além disso, alterações na geometria e na capacidade hidráulica do canal podem potencializar os impactos de cheias subsequentes, ampliando a extensão das áreas inundadas e agravando os riscos associados a eventos hidrológicos extremos (ANA, 2024).

Assim, torna-se essencial adotar estratégias integradas de planejamento e monitoramento ambiental voltadas à identificação e à gestão das áreas suscetíveis à inundação. A combinação de ferramentas como sistemas de informação geográfica (SIG), sensoriamento remoto e modelagem hidrológica oferece uma abordagem robusta para compreender e antecipar os efeitos das cheias sobre o território (Gilvear et al., 2016). As ferramentas SIG permitem o mapeamento das características físicas da bacia, como a rede de drenagem, o uso e ocupação do solo, a declividade e a geração de modelos digitais de elevação, informações fundamentais para subsidiar análises espaciais e alimentar modelos hidrológicos (Zhou et al., 2021; Escobar-Silva et al., 2023).

Nesse contexto, o acesso a bases de dados hidrológicos confiáveis e o uso de ferramentas consolidadas de modelagem hidrológica tornam-se fundamentais para o entendimento e a gestão dos riscos associados a eventos de inundação. A plataforma HidroWeb, mantida pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), constitui a principal fonte oficial de informações fluviométricas no Brasil, reunindo séries históricas essenciais para a análise do comportamento hidrológico dos rios e para a avaliação de eventos extremos (ANA,

2020). De forma complementar, o *software* HEC-RAS destaca-se como uma ferramenta amplamente utilizada em estudos de dinâmica fluvial e mapeamento de áreas inundáveis, sendo reconhecido por sua robustez e aplicabilidade em análises de escoamento em canais naturais e ambientes urbanos. A integração entre dados hidrológicos consistentes e ferramentas de modelagem adequadas representa um elemento-chave para subsidiar o planejamento territorial, a gestão de riscos e a tomada de decisão por parte de gestores públicos e órgãos de defesa civil (Iosub, 2015; USACE, 2021).

Apesar dos avanços no uso dessas ferramentas, ainda são relativamente escassos os estudos que aplicam a modelagem hidrológica de forma sistemática em sub-bacias de clima semiárido, com foco específico na delimitação de áreas inundáveis e na sua integração ao planejamento urbano e à gestão de riscos hidrológicos. Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas voltadas à análise de eventos de inundação e à modelagem hidrológica e hidráulica, sobretudo em áreas urbanas com maior disponibilidade de dados e infraestrutura de monitoramento. No entanto, ainda são relativamente menos frequentes estudos aplicados a municípios de pequeno porte, onde a limitação de dados hidrológicos e topográficos representa um desafio adicional para a realização de análises mais detalhadas da dinâmica espacial das inundações e de seus impactos sobre o território. (Cabral et al., 2016; Zhou et al., 2021).

1.1. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a dinâmica fluvial da sub-bacia do rio Carinhanha, com ênfase na identificação e delimitação de manchas de inundação em áreas urbanas, por meio da aplicação de modelagem hidrológica e técnicas de geoprocessamento, visando fornecer subsídios técnicos ao planejamento territorial, à gestão de riscos hidrológicos e ao apoio às ações de defesa civil.

1.1.1. Objetivos Específicos

O objetivo geral se divide em:

- Caracterizar a dinâmica físico-ambiental e hidrológica da sub-bacia do rio Carinhanha;
- Analisar a inserção da área urbana no contexto hidrológico da sub-bacia, identificando fatores de vulnerabilidade associados à ocupação do território e à dinâmica fluvial;
- Avaliar a influência das características topográficas, hidrológicas e do uso e ocupação do solo na formação de áreas inundáveis;

- Delimitar e analisar as manchas de inundação e os padrões de escoamento fluvial sob diferentes condições hidrológicas;
- Produzir subsídios técnicos para o planejamento territorial e a gestão de riscos hidrológicos, com ênfase no suporte às ações de prevenção.

1.2. Justificativa

A sub-bacia do rio Carinhanha desempenha um papel relevante na dinâmica hidrológica do rio São Francisco, contribuindo de forma significativa para a manutenção de suas vazões, especialmente em períodos de estiagem (Silveira, 2015). No entanto, essa importância hidrológica contrasta com a elevada vulnerabilidade ambiental e urbana observada ao longo do seu território, marcado por forte sazonalidade climática, com a ocorrência de cheias intensas no período chuvoso e longos períodos de seca ao longo do ano (CPRM, 2018; Salgueiro et al., 2021). Essa variabilidade hidrológica impõe desafios significativos às áreas urbanas inseridas na sub-bacia, especialmente aquelas situadas próximas às margens fluviais.

Eventos extremos de cheia têm provocado impactos recorrentes em áreas urbanizadas localizadas ao longo do rio Carinhanha e de seus cursos d'água associados, resultando no isolamento de comunidades, danos à infraestrutura urbana e prejuízos socioeconômicos expressivos (CORREIO24HORAS, 2022). Esses episódios estão fortemente associados ao regime pluviométrico da região, caracterizado por chuvas concentradas e intensas durante os meses de verão, cuja frequência tem se intensificado nos últimos anos, conforme apontado por estudos climatológicos realizados no norte de Minas Gerais e no oeste da Bahia (Salgueiro et al., 2021). A ocupação desordenada das margens fluviais e a expansão urbana em áreas naturalmente sujeitas à inundação ampliam a exposição da população aos riscos hidrológicos, potencializando os efeitos adversos das cheias sobre o ambiente urbano (Lopes, 2013).

Além dos impactos diretos sobre a população e a infraestrutura, as inundações em áreas urbanas comprometem o funcionamento dos sistemas de mobilidade, o acesso a serviços essenciais e a capacidade de resposta dos municípios frente a eventos extremos. A ausência de informações espaciais detalhadas sobre a extensão das áreas inundáveis dificulta a adoção de medidas preventivas, o ordenamento adequado do uso e ocupação do solo e a atuação eficiente dos órgãos de defesa civil. Nesse sentido, a identificação e a delimitação de manchas de inundação configuram-se como instrumentos fundamentais para o planejamento territorial e para a redução da vulnerabilidade urbana em bacias hidrográficas sujeitas a cheias recorrentes (ANA, 2024).

Diante desse cenário, justifica-se a realização de estudos voltados à análise da dinâmica fluvial e à delimitação de áreas suscetíveis à inundação em contextos urbanos inseridos na sub-bacia do rio Carinhanha. A aplicação integrada de modelagem hidrológica e técnicas de geoprocessamento tem se mostrado uma abordagem eficaz para a compreensão da interação entre o escoamento fluvial e o espaço urbano, permitindo a geração de informações estratégicas para o planejamento urbano, a gestão de riscos hidrológicos e a tomada de decisão por parte de gestores públicos (Zhou et al., 2021; Escobar-Silva et al., 2023).

Assim, a presente pesquisa se justifica pela necessidade de produzir subsídios técnicos que contribuam para a prevenção e mitigação dos impactos associados a eventos de inundação em áreas urbanas da sub-bacia do rio Carinhanha. Ao fornecer uma base técnica para o ordenamento territorial e para o fortalecimento das políticas públicas de gestão de riscos, o estudo busca colaborar para a construção de cidades mais resilientes, seguras e adaptadas às condições hidrológicas e climáticas da região.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: Contexto e Funções

O sistema hidrográfico do rio São Francisco configura-se como um dos mais importantes do Brasil, não apenas por sua vasta extensão territorial, mas também pelas diversas funções que desempenha. Suas águas são amplamente utilizadas para o abastecimento de populações urbanas e rurais, irrigação de áreas agrícolas, geração de energia hidrelétrica, atividades pesqueiras e transporte fluvial, além de exercer papel essencial na conservação de ecossistemas e na conectividade entre diferentes biomas (CBHSF, 2020). Sua bacia cobre uma área de aproximadamente 639 mil km², o que representa cerca de 7,5% do território nacional, estendendo-se por sete unidades federativas: Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás e o Distrito Federal (ANA, 2021; CBHSF, 2024).

Ao longo dos seus aproximadamente 2.800 km de extensão, o São Francisco percorre regiões com características fisiográficas bastante distintas. Essa heterogeneidade justifica sua subdivisão em quatro grandes regiões: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco. Cada uma delas apresenta padrões próprios de precipitação, sazonalidade e atuação de sistemas atmosféricos, resultando em dinâmicas hidrológicas particulares e em diferentes formas de ocupação do território. Essa variedade interfere diretamente na disponibilidade hídrica, na frequência de eventos extremos e nas estratégias adotadas para o manejo dos recursos naturais (Rocha et al., 2022).

A rede de drenagem vinculada ao rio principal é composta por 36 afluentes considerados prioritários sob a ótica hidrológica, dos quais 19 possuem regime perene. Entre esses, ganham destaque os cursos d'água localizados na margem esquerda, como os rios Paracatu, Urucuia, Carinhanha, Corrente e Grande, que desempenham papel fundamental na manutenção do escoamento do São Francisco, especialmente em períodos de baixa disponibilidade hídrica. Esses tributários responderam por grande parte da vazão total do rio entre os anos de 1950 e 1976, mesmo representando uma parcela menor da área total da bacia, o que reforça sua importância para o equilíbrio hidrológico regional (Pereira et al., 2007).

Outro aspecto notável é a expressiva diversidade ecológica do território, resultante da sobreposição de diferentes zonas climáticas e da presença de três importantes biomas brasileiros: Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica. Essa composição confere à região uma ampla variedade de ecossistemas aquáticos e terrestres, muitos dos quais abrigam espécies endêmicas e habitats ecologicamente sensíveis. Áreas úmidas, veredas, matas ciliares e lagoas marginais formam um mosaico ambiental essencial para a manutenção da biodiversidade e para a

conectividade entre ambientes naturais, atuando como corredores ecológicos e zonas de reprodução da fauna silvestre (CBHSF, 2024).

Além de sua relevância ambiental e econômica, o rio São Francisco também possui papel histórico como vetor de integração nacional, conectando áreas com diferentes níveis de desenvolvimento social e estrutural. No entanto, a intensificação dos usos múltiplos da água, as mudanças no uso do solo e os efeitos das alterações climáticas têm desafiado a resiliência desse sistema. Eventos extremos como inundações severas vêm alterando o regime de vazões e comprometendo a qualidade ambiental, o que exige soluções de gestão cada vez mais integradas e adaptativas (CPRM, 2018).

2.2. A Sub-bacia do Rio Carinhanha: Aspectos Físicos, Climáticos e Socioambientais

A sub-bacia hidrográfica do rio Carinhanha localiza-se na margem esquerda do rio São Francisco, atuando como limite natural entre os estados da Bahia e de Minas Gerais. Inserida no curso médio da bacia do São Francisco, essa unidade de drenagem possui área aproximada de 17.000 km² e desempenha papel estratégico na dinâmica hidrológica regional. A sub-bacia situa-se em uma zona de transição ecológica entre os biomas Cerrado e Caatinga, o que lhe confere elevada heterogeneidade ambiental e influência direta sobre os processos hidrológicos que ocorrem em seu território (Salgueiro et al., 2011).

O clima da região é predominantemente tropical semiúmido, com influência do regime semiárido em sua porção leste. As precipitações apresentam forte sazonalidade, concentrando-se principalmente entre os meses de novembro e abril, enquanto o período seco se estende, de modo geral, de maio a outubro. Essa distribuição das chuvas reflete-se diretamente no comportamento hidrológico do rio Carinhanha, que apresenta variações expressivas de vazão ao longo do ano, com implicações para o abastecimento hídrico, o desenvolvimento das atividades agrícolas e a gestão dos recursos naturais da bacia (Salgueiro et al., 2021).

Do ponto de vista hidrológico, o rio Carinhanha é reconhecido como um dos principais tributários perenes do São Francisco, contribuindo de forma significativa para a manutenção do regime de base do rio principal, especialmente durante os períodos de estiagem (Salgueiro et al., 2021). Estudos baseados em séries históricas indicam uma tendência de redução das vazões médias nas últimas décadas, associada principalmente à diminuição das precipitações e às mudanças no uso e ocupação do solo, fatores que afetam a disponibilidade hídrica e aumentam a vulnerabilidade da bacia a eventos hidrológicos extremos (Collischonn et al., 2021).

Geologicamente, a sub-bacia está inserida sobre o Sistema Aquífero Urucua, constituído por rochas sedimentares do Grupo Urucua, que conferem elevada capacidade de

armazenamento de água subterrânea à região. Esse sistema aquífero exerce papel relevante na regularização das vazões fluviais, contribuindo para a sustentação dos cursos d'água durante os períodos secos. Contudo, a intensificação das atividades antrópicas, especialmente associadas à expansão agropecuária, tem pressionado os sistemas naturais da bacia, demandando maior atenção quanto ao uso sustentável dos recursos hídricos e à proteção das áreas de recarga (Borges et al., 2013).

Sob a ótica ambiental e territorial, a substituição progressiva da cobertura vegetal nativa por usos antrópicos tem ampliado a vulnerabilidade da sub-bacia frente a eventos hidrológicos extremos. Áreas com declividades mais acentuadas, solos frágeis e ocupação inadequada tendem a apresentar maior sensibilidade às variações climáticas, o que reforça a necessidade de planejamento integrado do uso do solo e de políticas públicas voltadas à conservação ambiental e à redução de riscos (Borges et al., 2013).

Além das fragilidades ambientais, a sub-bacia do rio Carinhanha apresenta vulnerabilidades sociais associadas à irregularidade do regime hidrológico. Eventos extremos, como cheias intensas durante o período chuvoso e estiagens prolongadas, afetam diretamente as populações ribeirinhas e as atividades econômicas locais. As inundações, em particular, geram impactos significativos sobre áreas urbanas situadas próximas à calha fluvial, causando danos à infraestrutura, comprometendo a mobilidade e ampliando os riscos à população. Diante desse contexto, a gestão da sub-bacia exige estratégias integradas que articulem monitoramento hidrológico, ordenamento territorial e ações voltadas à mitigação dos riscos associados a eventos de inundação (Salgueiro et al., 2021; Collischonn et al., 2021).

2.3. Período de Cheias: Inundações e seus Impactos

Durante os períodos de cheia, a sub-bacia do rio Carinhanha enfrenta importantes desafios relacionados à dinâmica de escoamento superficial, refletindo-se diretamente em impactos sobre áreas urbanas e comunidades ribeirinhas. O município de Carinhanha (BA), situado na foz da sub-bacia, possui zonas naturalmente suscetíveis à inundação. Em grande parte desses locais, a ocupação urbana ocorreu sem o devido planejamento territorial, o que contribui para a intensificação dos efeitos das cheias sazonais (Carinhanha, 2017).

Essas inundações recorrentes acarretam consequências sociais e econômicas relevantes, uma vez que residências e estabelecimentos comerciais são frequentemente danificados, gerando perdas materiais significativas e, em algumas situações, o deslocamento temporário de famílias. Tais eventos também comprometem atividades econômicas tradicionais, como a agricultura familiar e a pesca artesanal, que são diretamente afetadas pela perda de

infraestrutura e pelas alterações nos ciclos hidrológicos e ecológicos da região (Vasconcelos et al., 2011).

Do ponto de vista ambiental, os processos de cheia exercem papel importante na conectividade hidrológica dos ecossistemas aquáticos. Durante esses episódios, há uma ligação temporária entre o canal principal e as lagoas marginais, fundamentais para o ciclo reprodutivo de diversas espécies aquáticas. Contudo, essa conectividade é prejudicada quando essas áreas estão degradadas ou ocupadas de forma irregular, impactando negativamente a biodiversidade e comprometendo o equilíbrio ecológico regional (Vasconcelos et al., 2011).

Diante desse cenário, reforça-se a necessidade de uma abordagem integrada de gestão dos eventos de cheia. O Plano de Saneamento Básico de Carinhanha (Carinhanha, 2017) já identifica as vulnerabilidades existentes e propõe medidas como a requalificação de áreas urbanas, a remoção de ocupações em zonas alagáveis e a implantação de sistemas eficientes de drenagem pluvial. Essas ações, quando articuladas com esforços interinstitucionais, ganham ainda mais relevância. Iniciativas coordenadas por instituições como o Serviço Geológico do Brasil (SGB) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) têm discutido estratégias de monitoramento, implantação de sistemas de alerta hidrológico e compartilhamento de boas práticas, com vistas a reduzir os impactos socioambientais decorrentes de eventos hidrológicos extremos (SGB; ANA, 2024).

2.4. Uso de Geoprocessamento na Análise Hidrológica e no Mapeamento de Áreas Inundáveis

O geoprocessamento, por meio da aplicação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), consolidou-se como uma ferramenta fundamental para a análise espacial de fenômenos hidrológicos e para a gestão de riscos associados a eventos de inundação, especialmente em bacias hidrográficas localizadas em regiões com limitações na disponibilidade de dados primários. Essa abordagem permite a integração, organização e análise de informações espaciais provenientes de diferentes fontes, favorecendo a compreensão da dinâmica hidrológica e subsidiando o planejamento territorial e a mitigação de riscos (Cabral et al., 2016; Zhou et al., 2021).

No contexto da análise de inundações, o geoprocessamento exerce papel estratégico ao fornecer suporte à modelagem hidrológica, permitindo a representação espacial da bacia hidrográfica e de seus principais atributos físicos. Por meio de ferramentas SIG, é possível caracterizar a rede de drenagem, o relevo, o uso e a ocupação do solo e outros elementos que influenciam o comportamento do escoamento superficial. Essas informações são amplamente

reconhecidas na literatura como essenciais para a identificação de áreas suscetíveis à inundação e para a interpretação dos impactos de eventos extremos em ambientes urbanos e periurbanos (Escobar-Silva et al., 2023).

Diversos estudos demonstram a eficácia da integração entre geoprocessamento e modelagem hidrológica em análises de risco hidrológico. Reis (2015), por exemplo, demonstrou o potencial do geoprocessamento para análises hidrológicas em municípios com baixa disponibilidade de dados, destacando que a utilização de modelos digitais de elevação e camadas temáticas de uso do solo permite a identificação de zonas de escoamento preferencial e de áreas propensas ao acúmulo de água. Segundo o autor, essas informações são fundamentais para subsidiar análises hidráulicas e orientar estratégias de planejamento urbano e ordenamento territorial.

De forma semelhante, Cabral et al. (2016), aplicaram ferramentas SIG como suporte à simulação hidrológica em área urbana do município de Crato (CE), evidenciando que a organização e o tratamento adequado dos dados espaciais em ambiente SIG contribuem significativamente para a confiabilidade dos mapas de áreas inundáveis. Os autores ressaltam que a qualidade dos resultados está diretamente relacionada à consistência das informações espaciais utilizadas como base para as simulações

Outro aspecto relevante do uso do geoprocessamento refere-se à geração de geometrias e parâmetros espaciais compatíveis com modelos hidrológicos amplamente utilizados na literatura. Mesmo em contextos onde não há disponibilidade de levantamentos topográficos ou batimétricos detalhados, estudos indicam que a extração de informações geométricas a partir de modelos digitais de elevação pode fornecer uma base consistente para a simulação de escoamento e para o mapeamento de áreas inundáveis, desde que observadas as limitações inerentes à resolução dos dados utilizados (Escobar-Silva et al., 2023).

Em âmbito internacional, Zhou et al. (2021) propuseram uma abordagem simplificada para o mapeamento de áreas urbanas suscetíveis a inundações, baseada no uso de ferramentas SIG e dados topográficos de livre acesso, demonstrando que o geoprocessamento pode viabilizar análises eficientes mesmo em cenários de restrição de dados. Resultados semelhantes foram obtidos por Mustafa et al. (2023), que aplicaram técnicas de geoprocessamento para a caracterização física de uma bacia urbana em Erbil, no Iraque, integrando informações de topografia, uso do solo e solo a modelos hidrológico e hidráulicos, evidenciando o potencial da metodologia para apoiar a gestão de riscos em áreas urbanas.

2.5. Obtenção e Tratamento de Dados Hidrológicos

A utilização de séries históricas de vazão constitui um elemento fundamental em estudos hidrológicos voltados à análise de eventos extremos, como cheias e estiagens, bem como à compreensão da dinâmica fluvial em bacias hidrográficas. A literatura destaca que a confiabilidade de modelos hidrológicos e hidráulicos está diretamente associada à qualidade, à extensão temporal e ao nível de consistência dos dados fluviométricos empregados (WMO, 2008; Tucci, 2013). Nesse contexto, destaca-se a plataforma HidroWeb, desenvolvida e mantida pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, como a principal base oficial de dados hidrológicos do Brasil, amplamente utilizada em pesquisas científicas e aplicações técnicas (ANA, 2020).

A HidroWeb disponibiliza séries temporais de estações fluviométricas e pluviométricas distribuídas em todo o território nacional, com diferentes níveis de consistência e controle de qualidade. O acesso gratuito a essas informações possibilita a análise de vazões, a avaliação da disponibilidade hídrica e a caracterização de eventos hidrológicos extremos em diferentes escalas espaciais e temporais. Estudos apontam que a utilização de séries contínuas, com baixa incidência de falhas, é especialmente relevante em regiões de elevada variabilidade climática, como áreas de transição para o semiárido, onde a resposta hidrológica dos rios tende a apresentar maior irregularidade (Felix et al., 2016).

Diversos autores ressaltam a importância da adoção de critérios técnicos na seleção e no tratamento de séries históricas de vazão, como forma de garantir maior representatividade hidrológica e robustez às análises. Entre esses critérios, destacam-se a escolha de séries com extensão temporal adequada, níveis satisfatórios de consistência e controle das lacunas nos registros. Abordagens desse tipo têm sido amplamente empregadas em estudos hidrológicos e hidráulicos no Brasil, contribuindo para a padronização de procedimentos e para a reprodutibilidade científica dos resultados (Calegario et al., 2024).

A utilização de dados fluviométricos da HidroWeb em análises de cheias e mapeamento de áreas inundáveis é recorrente na literatura. Verçosa (2019), por exemplo, empregou séries históricas de vazão para a simulação de inundações em trecho urbano do rio Capibaribe, em Recife (PE), evidenciando a relevância da seleção criteriosa das estações fluviométricas para a confiabilidade dos resultados. De modo geral, estudos dessa natureza utilizam parâmetros estatísticos derivados das séries históricas, como vazões representativas de períodos chuvosos e secos, integrando essas informações a análises espaciais em ambiente SIG, com o objetivo de compreender padrões hidrológicos e subsidiar avaliações de risco de inundação.

Dessa forma, observa-se que o tratamento adequado das séries fluviométricas, aliado à adoção de critérios técnicos bem definidos, constitui um aspecto central para a confiabilidade das análises hidrológicas e hidráulicas. Esse rigor é particularmente relevante em estudos voltados ao planejamento territorial, à gestão de riscos hidrológicos e à mitigação de impactos associados a eventos extremos em bacias hidrográficas brasileiras (Taffarello et al., 2016).

2.6. Modelagem Hidrológica com HEC-RAS: Aplicações e Potencialidades

A modelagem hidrológica consolidou-se como uma abordagem essencial para a análise de riscos hídricos, sobretudo em regiões vulneráveis a eventos extremos, como ocorre em muitas bacias do semiárido brasileiro, incluindo a sub-bacia do rio Carinhanha. O entendimento do escoamento da água em canais naturais é indispensável tanto para avaliar as cheias e vazantes quanto para subsidiar o planejamento do uso do solo de maneira mais técnica e preventiva. Nesse cenário, o *software* HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*) destaca-se como uma das principais ferramentas de suporte, pois possibilita simulações de escoamentos permanentes e temporários, operando em modelos 1D e 2D e integrando-se de forma eficiente a Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (Mendes et al., 2022).

O funcionamento do HEC-RAS baseia-se nas equações de Saint-Venant, que representam a conservação da massa e do movimento do escoamento em canais abertos (Chaudhry, 2008). As seções transversais dos rios geralmente são obtidas a partir levantamentos batimétricos, o que constitui uma desvantagem em áreas com carência de dados detalhados, como é o caso da sub-bacia do Carinhanha. Além disso, a ferramenta permite simular cenários diversos de chuva, com diferentes tempos de retorno, possibilitando prever a extensão das inundações e identificar trechos mais suscetíveis a riscos (Siqueira, 2023).

Entre os benefícios do uso do HEC-RAS na modelagem hidrológica estão sua gratuidade, as constantes atualizações promovidas por instituições oficiais, como o US Army Corps of Engineers, e a possibilidade de integração com *softwares* como QGIS e ArcGIS (USACE, 2021). Essa interoperabilidade viabiliza a geração de mapas de inundação, a identificação de áreas críticas, o mapeamento da velocidade do escoamento e o cálculo das áreas afetadas em cada evento (Urbani et al., 2023). Mesmo em situações com ausência de dados batimétricos precisos, resultados satisfatórios podem ser obtidos mediante calibração com informações históricas e dados secundários, como demonstrado por Fonseca (2021).

Diversos estudos no Brasil validaram a eficiência dessa ferramenta. Fonseca (2021), por exemplo, aplicou o HEC-RAS na bacia do rio Quitandinha, em Petrópolis (RJ), e obteve elevada precisão na delimitação da área alagada durante o verão de 2019, alcançando 95% de

acerto em relação aos registros de campo. O autor também destacou que, mesmo em áreas urbanizadas e com grande declividade, a associação do HEC-RAS ao HEC-HMS gera resultados consistentes para o planejamento urbano e a mitigação de riscos. Mendes et al. (2022), por sua vez, ressaltaram a relevância dos MDEs gerados por LiDAR, integrados ao HEC-RAS, no estudo da bacia do córrego Botafogo, em Goiânia (GO), para identificar pontos de transbordamento e avaliar a eficiência da drenagem sob eventos de chuva intensa.

Outro exemplo expressivo foi apresentado por Siqueira (2023), que aplicou conjuntamente os softwares HEC-HMS e HEC-RAS na modelagem da bacia do rio Jundiá (SP). O estudo permitiu simular cenários de inundação e calcular o Índice de Perigo (IP), revelando que a intensificação dos eventos ampliava a exposição das populações de baixa renda, reforçando a importância do método como instrumento de apoio às decisões públicas. Urbani et al. (2023), em análise de 11 eventos históricos no córrego Ipiranga (SP), também constataram que mais da metade das edificações atingidas por inundações situavam-se em áreas ocupadas por grupos socialmente vulneráveis.

A construção de mapas de inundação no âmbito da modelagem hidrológica com o HEC-RAS depende de informações como a geometria do canal, coeficientes de rugosidade, hidrogramas e modelos de elevação do terreno. Com base nesses dados, a ferramenta simula o avanço da água e exporta os resultados em formatos compatíveis com softwares de geoprocessamento (USACE, 2021). A calibração, por sua vez, pode ser realizada a partir de registros históricos, imagens, observações de campo ou séries pluviométricas, assegurando maior confiabilidade aos resultados (Fonseca, 2021). Mesmo em locais com limitação de dados batimétricos, como a sub-bacia do rio Carinhanha, a utilização de MDEs ajustados e validados qualitativamente permite gerar informações úteis para a gestão territorial e a prevenção de desastres.

Os produtos resultantes dessa modelagem, em especial os mapas de inundação, constituem instrumentos estratégicos para o planejamento urbano. Eles orientam a delimitação de áreas que não devem ser ocupadas, auxiliam a definição de rotas de evacuação, fundamentam a implantação de sistemas de alerta e subsidiam o direcionamento de investimentos públicos em drenagem (Brasil, 2016). Em regiões semiáridas, onde as cheias são menos frequentes, mas caracterizadas por grande intensidade, como no rio Carinhanha, o uso do HEC-RAS torna-se ainda mais relevante. Nesse sentido, a ferramenta ultrapassa seu caráter técnico, configurando-se como apoio estratégico no contexto da modelagem hidrológica para a construção de cidades mais seguras e resilientes (Siqueira, 2023; Urbani et al., 2023).

2.7. Planejamento Urbano e Gestão de Riscos Hidrológicos

A gestão urbana em regiões sujeitas a eventos hidrológicos extremos, como inundações recorrentes e períodos prolongados de seca, representa um desafio persistente para municípios inseridos em bacias hidrográficas de elevada variabilidade climática. As inundações afetam diretamente a infraestrutura urbana, ocasionando alagamentos em vias públicas, danos a edificações, interrupções no sistema viário e prejuízos socioeconômicos significativos, sobretudo em áreas ocupadas de forma desordenada e próximas às margens fluviais. Além dos impactos materiais, esses eventos podem representar riscos à integridade física da população, podendo resultar em desalojamento, ferimentos e, em casos mais severos, na perda de vidas humanas (Amaral et al., 2020; Cea et al., 2022). Diante desse cenário, torna-se imprescindível a adoção de abordagens integradas que articulem o planejamento urbano, o monitoramento hidrológico e a gestão de riscos, com foco na redução da vulnerabilidade das áreas urbanas suscetíveis a eventos de inundação.

Embora existam instrumentos legais e normativos que regulamentam a ocupação de áreas potencialmente inundáveis, a literatura aponta fragilidades recorrentes no contexto institucional brasileiro. A sobreposição de normas, a insuficiência de fiscalização e, em alguns casos, a regularização de ocupações em áreas de risco contribuem para a manutenção da vulnerabilidade urbana frente a eventos hidrológicos extremos (Amaral et al., 2020). Essa realidade é particularmente crítica em municípios de pequeno e médio porte, que frequentemente dispõem de limitada capacidade técnica, financeira e institucional para implementar medidas preventivas e ações de adaptação de forma efetiva (Rasch, 2016).

Estudos recentes indicam que estratégias baseadas exclusivamente em soluções estruturais, como obras de canalização ou contenção de cursos d'água, mostram-se insuficientes para enfrentar a complexidade dos riscos urbanos contemporâneos, especialmente diante do aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos associados às mudanças climáticas (Cea et al., 2022). Nesse contexto, observa-se uma mudança de paradigma, com a valorização de abordagens voltadas à gestão integrada do risco, que priorizam o ordenamento do uso e ocupação do solo, a ampliação da resiliência urbana e o fortalecimento de sistemas de monitoramento e alerta (Amaral et al., 2020).

Ferramentas de planejamento territorial, como o zoneamento ambiental e o mapeamento de áreas suscetíveis à inundação, desempenham papel fundamental na orientação de decisões urbanísticas mais seguras e sustentáveis. A eficácia desses instrumentos, contudo, depende diretamente da disponibilidade de dados técnicos confiáveis e da sua incorporação aos

processos de formulação de políticas públicas, condição que nem sempre se verifica em contextos urbanos com baixa capacidade institucional (Cea et al., 2022; Rasch, 2016).

Por fim, a vulnerabilidade social constitui um fator determinante na ampliação dos impactos associados a eventos hidrológicos extremos. Municípios com baixos indicadores socioeconômicos tendem a apresentar maior exposição aos riscos e menor capacidade de resposta e recuperação após eventos de inundação. Nesse sentido, a construção de indicadores e índices de vulnerabilidade que integrem variáveis ambientais, urbanísticas e sociais tem sido apontada como uma estratégia relevante para subsidiar o direcionamento de investimentos públicos e apoiar a elaboração de planos de contingência e adaptação mais eficazes (Rasch, 2016; Malta et al., 2017).

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização da Sub-bacia do rio Carinhanha

A caracterização da sub-bacia do rio Carinhanha teve como objetivo organizar e sistematizar informações físicas e territoriais relevantes para subsidiar as análises hidrológicas desenvolvidas ao longo do trabalho.

O levantamento e o processamento dos dados foram conduzidos em ambiente de Sistema de Informação Geográfica, utilizando o software QGIS. Foram empregadas bases cartográficas e temáticas para a representação dos principais atributos da sub-bacia, contemplando informações relacionadas à hidrografia, limites administrativos, relevo, uso e ocupação do solo, solos e geologia.

A partir dos dados altimétricos, foram elaborados produtos cartográficos de caráter topográfico, como mapas hipsométricos e de declividade, enquanto as informações de uso e ocupação do solo foram organizadas em classes temáticas, possibilitando a análise espacial da cobertura da terra. Os dados de solos e geologia foram utilizados para a composição de mapas temáticos que permitiram uma caracterização integrada do meio físico da sub-bacia.

O processamento das informações incluiu etapas de padronização cartográfica, recorte das bases ao limite da sub-bacia e organização das camadas temáticas em ambiente SIG. Os mapas e produtos gerados nessa etapa foram posteriormente utilizados como base para a descrição da área de estudo e para o suporte às análises desenvolvidas.

3.2. Determinação do Trecho para a Modelagem

A determinação do trecho do rio Carinhanha a ser modelado foi realizada por meio de uma análise exploratória ao longo do curso do rio, com o objetivo de identificar segmentos que atendessem aos requisitos técnicos necessários à aplicação da modelagem hidrológica para delimitação de manchas de inundação. Essa análise considerou, de forma integrada, critérios espaciais, hidrológicos e de disponibilidade de dados.

Inicialmente, foram avaliados os trechos do rio quanto à presença de áreas urbanizadas adjacentes ao canal, uma vez que a aplicação da modelagem hidrológica tem como finalidade subsidiar o planejamento urbano e a gestão de riscos hidrológicos. Em seguida, foi verificada a proximidade entre os trechos potenciais e estações fluviométricas com séries históricas de vazão consistidas e de longa duração, condição essencial para a definição confiável das vazões de entrada do modelo hidrológico.

A partir da aplicação desses critérios, foi selecionado um trecho que apresenta simultaneamente interação direta entre o canal fluvial e área urbana e disponibilidade de dados fluviométricos adequados, permitindo a condução da modelagem hidrológica com maior robustez técnica.

3.3. Modelagem hidráulica

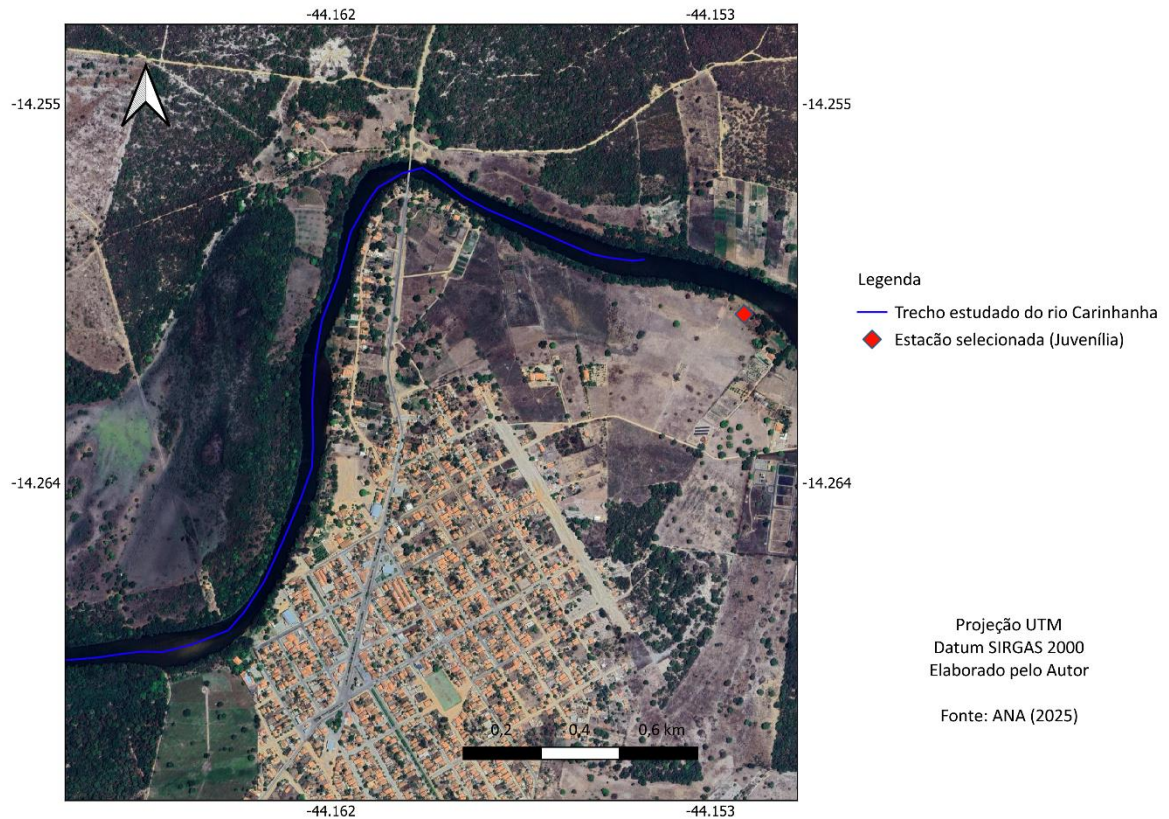
A modelagem hidráulica será realizada utilizando o software HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*), desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, amplamente empregado na simulação de escoamentos unidimensionais e bidimensionais, bem como no mapeamento de áreas inundáveis (USACE, 2002). Este procedimento tem como objetivo determinar a mancha de inundação nos trechos urbanos selecionados do rio Carinhanha, a partir de cenários de vazão em condições de período de chuvas onde as cheias são mais frequentes.

3.3.1. Análise de Frequência de Vazões e Estimativa das Vazões de Projeto

A estimativa das vazões de projeto foi realizada a partir da análise estatística de séries históricas de vazão diária disponibilizadas pelo Sistema de Informações Hidrológicas (HIDROWEB), mantido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Inicialmente, procedeu-se à seleção das estações fluviométricas localizadas na região de interesse.

Com base nesses critérios, foi selecionada a estação fluviométrica de Juvenília (código 45260000), operada pelo SGB-CPRM no rio Carinhanha. Como pode-se observar a Figura 1, embora posicionada a jusante do trecho urbano analisado, verificou-se que a estação se encontra imediatamente após o limite do trecho modelado, não havendo contribuição de tributários com relevância hidráulica entre o ponto de medição e a área de estudo. Assim, as vazões registradas foram consideradas representativas das condições hidrológicas do trecho analisado, conforme procedimento amplamente adotado em estudos hidrológicos quando inexitem interferências significativas entre o ponto de medição e a seção de interesse (Tucci, 2013). As principais características da estação selecionada são apresentadas na Tabela 1.

Figura 1 - Mapa de localização da estação selecionada



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Tabela 1 - Dados da estação fluviométrica selecionada

| Estação | Código | Operador | Rio | Latitude | Longitude | Anos de dados | Área de drenagem (km ²) |
|-----------|----------|----------|----------------|----------|-----------|---------------|-------------------------------------|
| Juvenília | 45260000 | SGB-CPRM | rio Carinhanha | -14,26 | -44,15 | 60 | 16300 |

Fonte: ANA (2020)

As séries diárias de vazão foram submetidas a verificação de consistência, sendo considerados apenas os anos que apresentaram, no mínimo, 90% de dados válidos, entendidos como registros diários com valores de vazão efetivamente medidos e disponíveis na base de dados da estação fluviométrica. Esse critério foi adotado para reduzir a influência de lacunas significativas na série histórica e assegurar a representatividade estatística dos dados utilizados na análise, conforme recomendações da literatura especializada (WMO, 2008; Tucci, 2013). A partir das séries consistidas, foi construída a série de máximos anuais (AMAX), definida como o maior valor diário observado em cada ano hidrológico. A utilização da AMAX constitui

procedimento clássico em análises de frequência de cheias, por permitir a modelagem estatística de eventos extremos independentes (Chow, 1959; Tucci, 2013).

A análise de frequência das vazões máximas anuais foi conduzida com o auxílio do Sistema Especialista de Análise de Frequência (SEAF), ferramenta desenvolvida pela Universidade Federal de Minas Gerais (Cândido, 2003) e amplamente utilizada em estudos hidrológicos no Brasil (ANA, 2012; Campos, 2022). Inicialmente, a série AMAX foi submetida a testes estatísticos não paramétricos, incluindo o teste de Mann–Kendall, com o objetivo de verificar a independência e a homogeneidade temporal da série, avaliando a eventual presença de tendências monotônicas que pudessem comprometer a aplicação da análise de frequência clássica (WMO, 2008; Tucci, 2013).

Adicionalmente, foram aplicados testes para identificação de valores discrepantes, incluindo os testes de Grubbs & Beck e de assimetria, visando detectar eventos extremos atípicos que pudessem influenciar indevidamente o ajuste das distribuições de probabilidade (WMO, 2008; Campos, 2022).

Posteriormente, procedeu-se ao ajuste de diferentes distribuições de probabilidade de dois e três parâmetros, incluindo as distribuições Normal, LogNormal, Gumbel, Exponencial, Pearson tipo III, Log-Pearson tipo III, *Generalized Extreme Value* (GEV) e *Generalized Pareto* (GPA). A estimativa dos parâmetros foi realizada automaticamente pelo *software*, com base nos momentos amostrais e nos momentos-L, conforme metodologia implementada no SEAF. A seleção da distribuição mais adequada foi definida a partir de critérios estatísticos de aderência (WMO, 2008; Tucci, 2013; Campos, 2022).

3.3.2. Geometria do Canal

A geometria do canal no modelo hidrológico foi construída a partir da integração entre a topografia do terreno adjacente ao rio e a representação do leito fluvial obtida por batimetria, com o objetivo de compor seções transversais compatíveis com a simulação. Para isso, buscou-se um Modelo Digital de Elevação (MDE) para representar a topografia externa ao canal (margens e planície de inundação), enquanto o perfil do canal principal foi definido a partir de um levantamento batimétrico disponível na estação fluviométrica selecionada.

Considerando que o MDE não representa adequadamente a geometria submersa do canal, as elevações da superfície da água derivadas do MDE foram substituídas por um perfil batimétrico. Como a batimetria original estava expressa em valores relativos de profundidade, foi necessário convertê-la para cotas absolutas e compatibilizá-la com as larguras variáveis das

seções transversais do modelo. Assim, o procedimento metodológico foi estruturado em três etapas: (i) ajuste vertical da batimetria, (ii) ajuste horizontal do perfil e (iii) interpolação do perfil ajustado para os pontos das seções.

O ajuste vertical foi realizado a partir de um deslocamento altimétrico (*offset*), definido pela diferença entre a cota da margem esquerda obtida no MDE e o valor inicial da batimetria na mesma referência, conforme a Equação 1.

$$Z_{\text{bat}}(\text{inicial}) = Z_{\text{mde}}(\text{mde}) - \text{offset} \quad (1)$$

Onde:

- Offset corresponde ao deslocamento vertical aplicado ao perfil batimétrico
- $Z_{\text{mde}}(\text{mde})$ corresponde a cota altimétrica da margem esquerda obtida a partir do MDE;
- $Z_{\text{bat}}(\text{inicial})$ valor inicial da batimetria no ponto de referência, expresso em profundidade relativa.

Em seguida, o offset foi aplicado a todos os pontos do perfil batimétrico, convertendo-os em cotas absolutas compatíveis com o sistema altimétrico do modelo, conforme a Equação 2.

$$Z_{\text{corrigido}} = Z_{\text{bat}} + \text{offset} \quad (2)$$

Onde:

- $Z_{\text{corrigido}}$ corresponde a cota altimétrica corrigida do leito do rio após aplicação do offset;
- Z_{bat} corresponde ao valor da batimetria relativa em cada ponto do perfil do leito.

Após o ajuste vertical, procedeu-se ao ajuste horizontal do perfil batimétrico, uma vez que o levantamento disponível corresponde a uma única seção batimétrica pontual. Como as seções transversais extraídas do modelo de terreno apresentam larguras distintas entre as margens ao longo do trecho modelado, foi necessário realizar a adaptação horizontal do perfil batimétrico para compatibilizá-lo com a geometria de cada seção transversal. Esse procedimento permitiu representar de forma consistente a porção submersa do canal nas diferentes seções utilizadas na modelagem hidráulica. Para compatibilizar essas dimensões, foi

calculado um fator de escala horizontal definido pela razão entre a largura da seção (obtida a partir do MDE) e a largura total do levantamento batimétrico, conforme a Equação 3.

$$EscalaH = \frac{L_{seção(mde)}}{L_{bat}}$$
 (3)

Onde:

- EscalaH corresponde ao fator de ajuste horizontal aplicado ao perfil batimétrico;
- Lseção(mde) corresponde a largura total da seção transversal obtida a partir do MDE;
- Lbat corresponde a largura total do levantamento batimétrico original.

As distâncias do perfil batimétrico foram então multiplicadas por esse fator, preservando a forma geométrica do canal e adequando sua extensão à largura efetiva de cada seção transversal.

Com o perfil batimétrico já ajustado em altitude e largura, realizou-se a interpolação das cotas para os pontos (*stations*) das seções transversais do modelo, mantendo-se inalteradas as posições horizontais estabelecidas pela topografia do terreno. As elevações do canal foram obtidas por interpolação linear a partir do perfil batimétrico ajustado, de forma geral conforme a Equação 4.

$$Z(x_i) = \frac{Z_{batajust}(x_{batajust}) - Z_{batajust}(x_{batajust_min})}{x_{batajust}(x_{batajust_max}) - x_{batajust}(x_{batajust_min})} \cdot (x_i - x_{batajust}(x_{batajust_min})) + Z_{batajust}(x_{batajust_min})$$
 (4)

Onde:

- Z(xi) corresponde a cota interpolada do leito no ponto *i* da seção transversal;
- xi corresponde a posição horizontal (station) do ponto *i* ao longo da seção transversal;
- Xbatajust corresponde às posições horizontais do perfil batimétrico após o ajuste;
- Zbatajust corresponde às cotas do perfil batimétrico após os ajustes vertical e horizontal.

Com isso as margens esquerda e direita das seções foram ajustadas para coincidir com as cotas do terreno fornecidas pelo MDE, assegurando continuidade geométrica entre o canal reconstruído e a planície de inundação. O procedimento descrito foi aplicado de forma uniforme às seções transversais do trecho modelado, resultando em uma geometria integrada e adequada à execução das simulações.

Por fim, após a obtenção das seções transversais com o perfil batimétrico corrigido, procedeu-se à geração de um Modelo Digital de Elevação do leito do rio a partir dessas seções,

utilizando a ferramenta RAS Mapper do HEC-RAS. Nesse procedimento, as cotas interpoladas do fundo do canal foram empregadas para a construção de uma superfície contínua representativa da batimetria ao longo de todo o trecho modelado. Em seguida, esse MDE do leito fluvial foi integrado ao Modelo Digital de Elevação previamente utilizado para representar o terreno adjacente ao rio, resultando em um modelo topográfico unificado que incorpora tanto a geometria submersa do canal quanto a topografia das margens e da planície de inundação. Esse MDE integrado foi então adotado como base geométrica para as simulações realizadas.

3.3.3. Coeficiente de rugosidade de Manning

O coeficiente de rugosidade de Manning utilizado na modelagem hidrológica do rio Carinhanha foi definido com base no método proposto por Cowan (1944) apud (Chow, 1959), amplamente empregado para a estimativa da resistência ao escoamento em canais naturais. Esse método consiste na composição do coeficiente de Manning a partir de parcelas que representam as características físicas do canal e da planície de inundação, permitindo incorporar, de forma sistemática, fatores como material do leito, irregularidades, variações geométricas, obstruções, vegetação e meandrização.

De acordo com Cowan (1944) apud (Chow, 1959), o coeficiente de rugosidade equivalente é calculado pela Equação 5.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \quad (5)$$

Onde os termos da equação possuem os seguintes significados (Cowan 1944 apud (Chow, 1959):

- n_0 corresponde ao valor básico do coeficiente de rugosidade para um canal retilíneo uniforme e com superfícies planas, definido conforme o material associado à superfície de contato (material do leito e das margens em contato direto com o escoamento);
- n_1 corresponde ao valor adicional correspondente às irregularidades presentes no curso d'água, tais como erosões, assoreamentos, saliências e depressões na superfície, que aumentam a turbulência e a resistência ao escoamento;
- n_2 corresponde ao valor associado à frequência de ocorrência de variações de forma da seção transversal, consideradas segundo seu potencial de causar perturbações no fluxo (alterações graduais, ocasionais ou frequentes);
- n_3 corresponde ao valor baseado na presença de obstruções ao escoamento, tais como deposição de blocos/matacões, raízes, troncos, estruturas e elementos que reduzam a

seção efetiva ou induzam turbulência; n4 corresponde ao valor referente à influência da vegetação no escoamento, avaliada segundo tipo, densidade e altura da cobertura vegetal e sua capacidade de introduzir resistência (sobretudo nas margens e planície inundável);

- m5 corresponde ao fator de correção associado ao grau de meandrização do curso d'água, definido pela relação entre o comprimento efetivo do trecho ao longo do canal e a distância retilínea entre seus extremos.

Para a atribuição dos valores aos componentes n0 a n4 e ao fator m5, foram utilizadas faixas recomendadas na literatura, conforme sintetizado na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores para obtenção do coeficiente de Manning equivalente

| Parâmetros e Condições do Canal | | Valores |
|--------------------------------------|-------------------------|---------------|
| n0 Material envolvido | Solo | 0,020 |
| | Rocha | 0,025 |
| | Pedregulho fino | 0,024 |
| | Pedregulho graúdo | 0,028 |
| n1 Grau de irregularidades | Liso | 0,000 |
| | Pequeno | 0,005 |
| | Moderado | 0,010 |
| | Severo | 0,020 |
| n2 Variações da seção transversal | Gradual | 0,000 |
| | Alternâncias ocasionais | 0,005 |
| | Alternâncias frequentes | 0,010 - 0,015 |
| n3 Efeito de obstruções | Desprezível | 0,000 |
| | Pequeno | 0,010 - 0,015 |

| | | |
|----------------------------|------------|---------------|
| | Apreciável | 0,020 - 0,030 |
| | Severo | 0,040 - 0,060 |
| n4 Vegetação | Baixa | 0,005 - 0,010 |
| | Média | 0,010 - 0,025 |
| | Alta | 0,025 - 0,050 |
| | Muito alta | 0,050 - 0,100 |
| m5 Grau de meandrização | Pequeno | 1,000 |
| | Apreciável | 1,150 |
| | Severo | 1,300 |

Fonte: Adaptado de Cowan (1944) apud Chow (1959)

A definição dos parâmetros foi conduzida distinguindo-se os termos considerados uniformes ao longo do trecho daqueles que foram definidos para cada seção transversal. Os termos n0, n1 e n2 foram definidos de forma uniforme, por apresentarem características gerais do canal no segmento analisado. Já os termos n3 (obstruções) e n4 (vegetação) foram determinados individualmente para cada seção transversal, a partir da análise do uso e ocupação do solo em ambiente SIG, dado o caráter espacialmente variável desses fatores ao longo da planície inundável.

Para o cálculo de um único valor representativo por seção, a contribuição de múltiplas classes interceptadas ao longo de cada seção transversal foi incorporada por meio de média ponderada, utilizando como pesos os comprimentos L_i interceptados por cada classe i ao longo da seção. Assim, o termo equivalente de n3 e n4 foi calculado pela Equação 6.

$$\bar{n}, \bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^n (n_i \cdot L_i)}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (6)$$

Onde:

- L_i corresponde ao comprimento associado à classe i ao longo da seção transversal;

- n_{eq} representa os valores atribuídos às classes quanto ao efeito de obstruções e vegetação, definidos com base nas categorias e intervalos da Tabela 2.

O fator de meandrização (m_5) foi definido a partir da Equação 7 fazendo o cálculo da sinuosidade do trecho modelado, calculada pela razão entre o comprimento do canal medido ao longo do eixo do rio e a distância em linha reta entre os extremos do segmento.

$$S = \frac{L_c}{L_r} \quad (7)$$

Onde:

- S é a sinuosidade;
- L_c é o comprimento do canal ao longo do traçado do rio (*centerline*);
- L_r é a distância retilínea entre o início e o fim do trecho.

3.3.4. Definição das condições de contorno hidráulicas no HEC-RAS

As simulações foram realizadas no *software* HEC-RAS, desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers, em regime de escoamento permanente uniforme (*steady flow*). Nesse tipo de simulação, a correta definição das condições de contorno é fundamental para o fechamento do perfil hidráulico e para a obtenção de resultados fisicamente consistentes ao longo do trecho modelado (USACE, 2002; USACE, 2021).

De forma geral, em modelos unidimensionais de escoamento permanente, a condição de contorno de montante é definida a partir da vazão, enquanto a condição de contorno de jusante é responsável por estabelecer o nível d'água ou a declividade de energia necessária para o cálculo do perfil hidráulico. A escolha do tipo de condição de contorno deve considerar a disponibilidade de dados hidrológicos e hidráulicos, bem como as características geomorfológicas do trecho em estudo (Chow, 1959; USACE, 2002).

Neste trabalho, as vazões de projeto estimadas na análise de frequência hidrológica foram definidas metodologicamente como condição de contorno de montante, sendo aplicadas como vazões constantes, conforme requerido nas simulações em regime permanente. Essa abordagem é amplamente utilizada em estudos de mapeamento de áreas inundáveis e análise de cheias, por permitir a avaliação de diferentes cenários hidrológicos associados a tempos de retorno pré-definidos (Tucci, 2013; USACE, 2021).

Para o fechamento hidráulico do modelo, adotou-se a condição de contorno do tipo *Normal Depth*. Esse método estima a cota do nível d'água a partir da declividade de energia do escoamento (*friction slope*), parâmetro que representa a perda de carga ao longo do canal. De acordo com a documentação do HEC-RAS, a condição de contorno do tipo *Normal Depth* pode ser aplicada em situações nas quais a utilização de níveis d'água observados ou de curvas-chave não seja a alternativa mais adequada, sendo recomendada principalmente em canais naturais (USACE, 2002; USACE, 2021). No presente estudo, embora exista curva-chave associada à estação fluviométrica utilizada, optou-se pela adoção da condição *Normal Depth* em função da natureza das vazões aplicadas nas simulações, que correspondem a vazões de projeto estimadas por análise de frequência e associadas a tempos de retorno específicos. Nessa situação, a aplicação direta da curva-chave implicaria extrapolações fora do domínio de calibração da relação cota-vazão, podendo introduzir inconsistências na definição do nível d'água de contorno.

Metodologicamente, a declividade de energia utilizada na condição *Normal Depth* pode ser aproximada pela declividade média do fundo do canal ou do talvegue em trechos naturais, especialmente em rios de planície e baixo gradiente. Essa aproximação é considerada adequada na ausência de medições diretas da superfície d'água, desde que a declividade adotada seja compatível com a ordem de grandeza esperada para o tipo de canal analisado (Chow, 1959; Tucci, 2013; Knighton, 2014).

Considerando as limitações de dados batimétricos detalhados e a inexistência de medições contínuas de nível d'água nas extremidades do trecho modelado, a declividade de energia foi definida a partir da análise geométrica do canal reconstruído no modelo hidrológico. Essa abordagem metodológica permitiu estabelecer condições de contorno coerentes com as características físicas do trecho em estudo, assegurando a estabilidade numérica das simulações e a consistência dos perfis hidráulicos obtidos, conforme recomendado em estudos de modelagem hidrológica com dados limitados (USACE, 2002; Campos, 2022).

3.4. Validação do Modelo

A validação do modelo hidrológico foi realizada com o objetivo de avaliar a consistência dos resultados simulados frente a informações observadas, considerando a disponibilidade de dados hidrológicos, geométricos e espaciais para o trecho estudado do rio Carinhanha. Diante das limitações inerentes a estudos em canais naturais e da variabilidade temporal das seções transversais, optou-se pela aplicação de duas abordagens complementares

de validação, contemplando uma verificação quantitativa baseada em dados observados e uma análise qualitativa apoiada em registros espaciais históricos.

A validação quantitativa baseou-se na utilização de dados observados da estação fluviométrica selecionada, especificamente associados à data de levantamento da seção transversal utilizada como base para a construção da batimetria do trecho modelado. A seção transversal empregada na representação geométrica do canal foi obtida a partir de medições realizadas em 12/08/2019, data para a qual também estão disponíveis registros de vazão e cota do rio na estação fluviométrica. Considerando que a geometria das seções transversais pode sofrer alterações significativas ao longo do tempo, a escolha dessa data teve como objetivo reduzir inconsistências geométricas entre o modelo hidrológico e as condições reais observadas no campo.

Para essa etapa, a vazão observada na data de 12/08/2019 foi utilizada como dado de entrada no modelo hidrológico, sendo realizada uma simulação específica para esse cenário hidrológico. A simulação forneceu os resultados do nível d'água ao longo de todas as seções transversais do trecho modelado; entretanto, para fins de validação quantitativa, foi selecionada no modelo a seção transversal localizada mais a jusante, por ser a mais próxima da estação fluviométrica adotada no estudo. A comparação foi realizada em termos da elevação da lâmina d'água em relação ao fundo do rio, comparando a cota simulada pelo modelo com a cota registrada pela estação fluviométrica na mesma data, garantindo a compatibilidade temporal entre os dados analisados.

Como segunda abordagem de validação, foi adotada uma análise qualitativa baseada em imagens históricas de sensoriamento remoto, obtidas por meio da plataforma Google Earth Pro. Buscou-se imagens correspondentes a períodos chuvosos relevantes e de disponibilidade de imagens, visando a comparação espacial entre as áreas potencialmente inundáveis identificadas nas imagens e as manchas de inundação simuladas pelo modelo hidrológico. Essa análise teve como objetivo avaliar a coerência espacial entre os padrões de inundação observados historicamente e aqueles representados pelo modelo, especialmente no que se refere à extensão lateral da inundação na planície adjacente ao canal.

A utilização conjunta dessas duas abordagens permite uma avaliação mais abrangente do desempenho do modelo, combinando a comparação direta com dados hidrológicos observados e a verificação da representação espacial da inundação.

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir das análises desenvolvidas ao longo da metodologia, abrangendo a caracterização física da sub-bacia do rio Carinhanha, a definição do trecho urbano selecionado para estudo e os desdobramentos da modelagem hidrológica realizada.

Inicialmente, são descritas as principais características territoriais da sub-bacia, incluindo aspectos geográficos, geomorfológicos, geológicos e de ocupação do solo, que influenciam diretamente a dinâmica hidrológica regional.

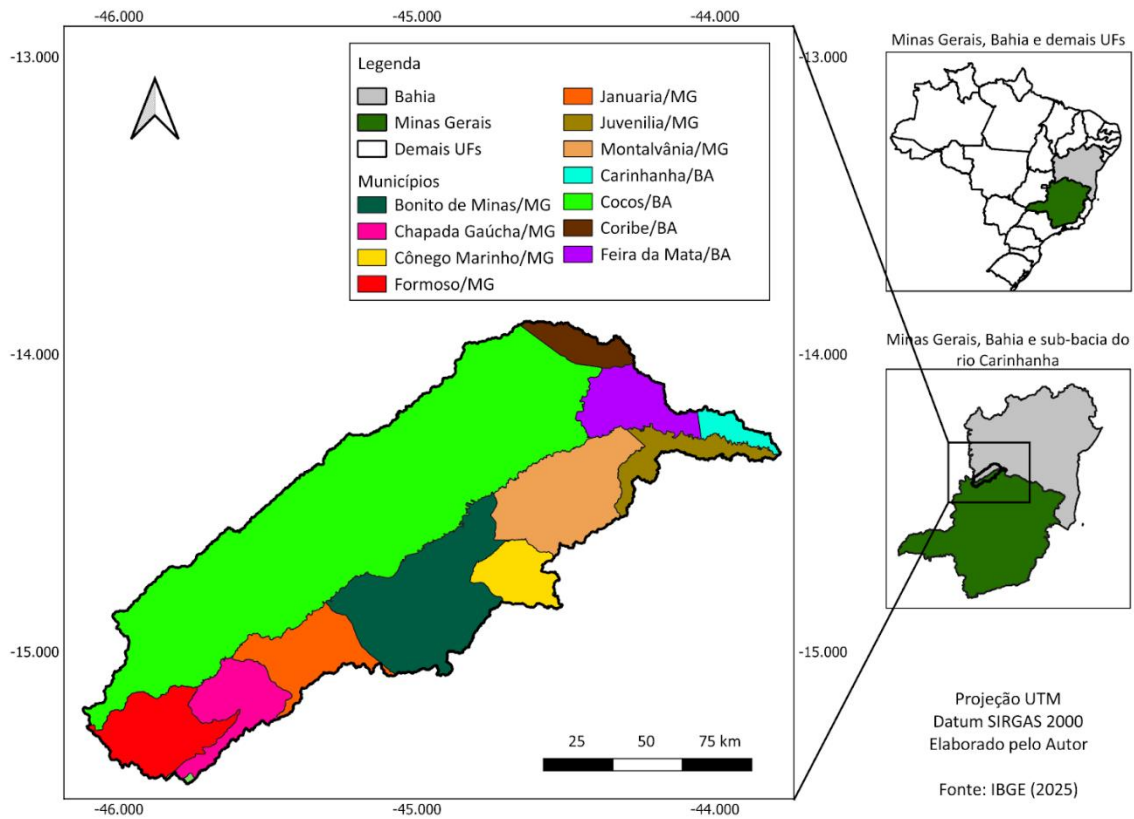
Na sequência, são expostos os resultados da análise de frequência das vazões máximas anuais e a definição das vazões de projeto utilizadas nas simulações hidráulicas. Posteriormente, são apresentados os resultados da modelagem realizada no HEC-RAS, incluindo a delimitação das manchas de inundação para diferentes cenários hidrológicos. Por fim, são discutidos os procedimentos e resultados da validação do modelo, tanto sob abordagem quantitativa quanto qualitativa.

4.1. Caracterização da Sub-bacia

4.1.1. Localização geográfica

Conforme ilustrado na Figura 2, observa-se que a sub-bacia apresenta ampla extensão territorial e significativa distribuição espacial entre os dois estados, com predominância de área no território mineiro. O mapa evidencia ainda a organização dos limites municipais e estaduais, permitindo compreender a inserção regional da sub-bacia no contexto da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco e sua relevância estratégica sob o ponto de vista da gestão interestadual dos recursos hídricos.

Figura 2 - Mapa de localização geográfica da sub-bacia do rio Carinhanha

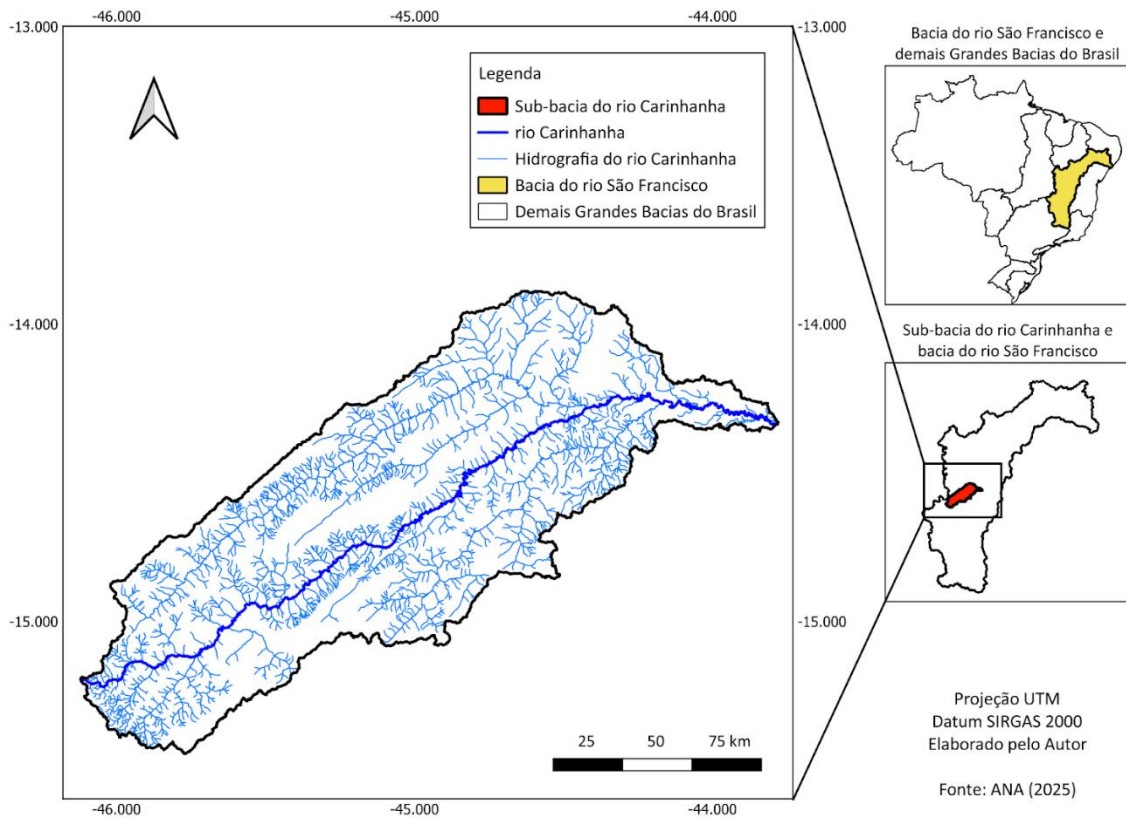


Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

4.1.2. Características hidrológicas

A partir de análise espacial realizada no software QGIS, obteve-se a delimitação da sub-bacia, com área estimada em aproximadamente 17.188 km². O rio Carinhanha, principal curso d'água da bacia, tem sua extensão com cerca de 474,6 km, seguindo direção predominante sudoeste–nordeste, até sua confluência com o rio São Francisco. A Figura 3 destaca os limites da sub-bacia, o curso do rio Carinhanha e sua inserção dentro da bacia hidrográfica do São Francisco. As informações cartográficas utilizadas para a elaboração do mapa foram obtidas a partir de bases oficiais disponibilizadas pela ANA e tratadas em ambiente de geoprocessamento.

Figura 3 - Mapa hidrográfico da sub-bacia do rio Carinhanha

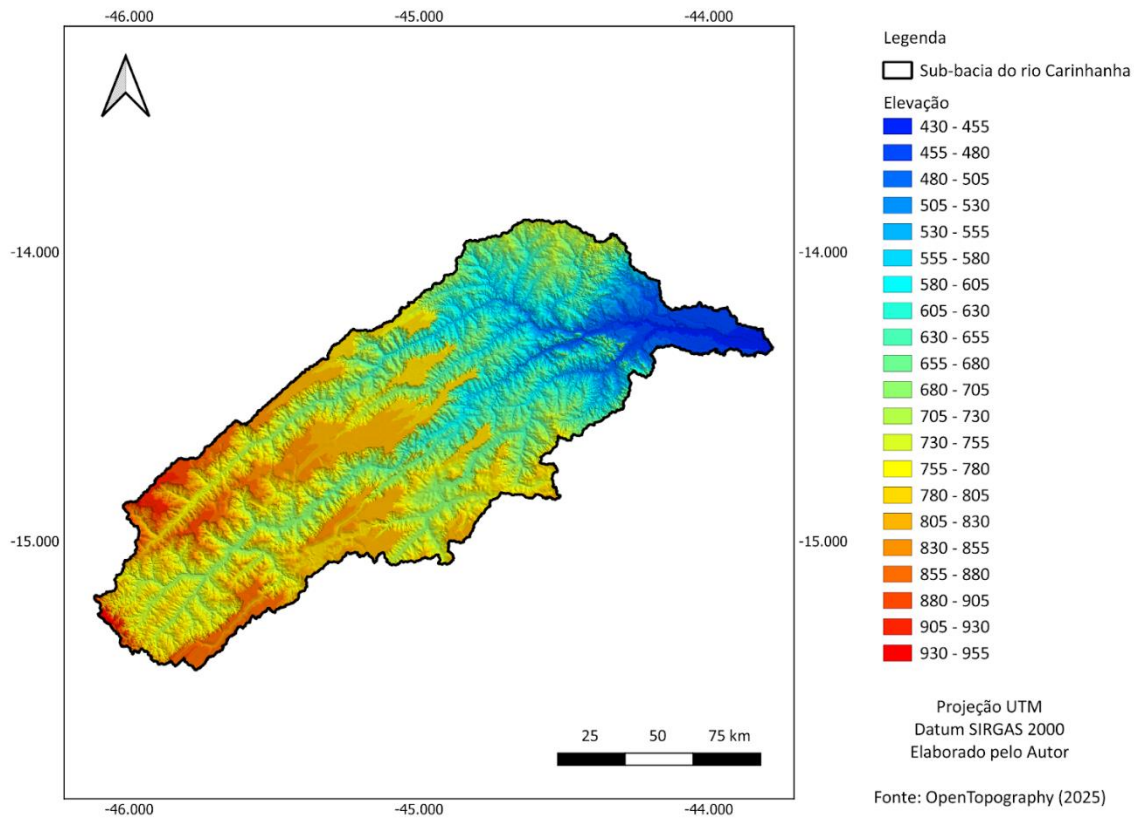


Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

4.1.3. Características do relevo

No que se refere às características do relevo, a sub-bacia do rio Carinhanha apresenta um perfil altimétrico heterogêneo, com elevações que variam aproximadamente entre 430 e 955 metros, conforme ilustrado no mapa altimétrico da Figura 4. As cotas mais elevadas concentram-se na porção sudoeste da bacia, especialmente nas áreas de nascente do rio, enquanto as menores altitudes localizam-se nas regiões norte e nordeste, nas proximidades da foz. Esse gradiente altitudinal demonstra influência direta na compartimentação fisiográfica da paisagem e nos padrões de escoamento superficial observados ao longo da bacia.

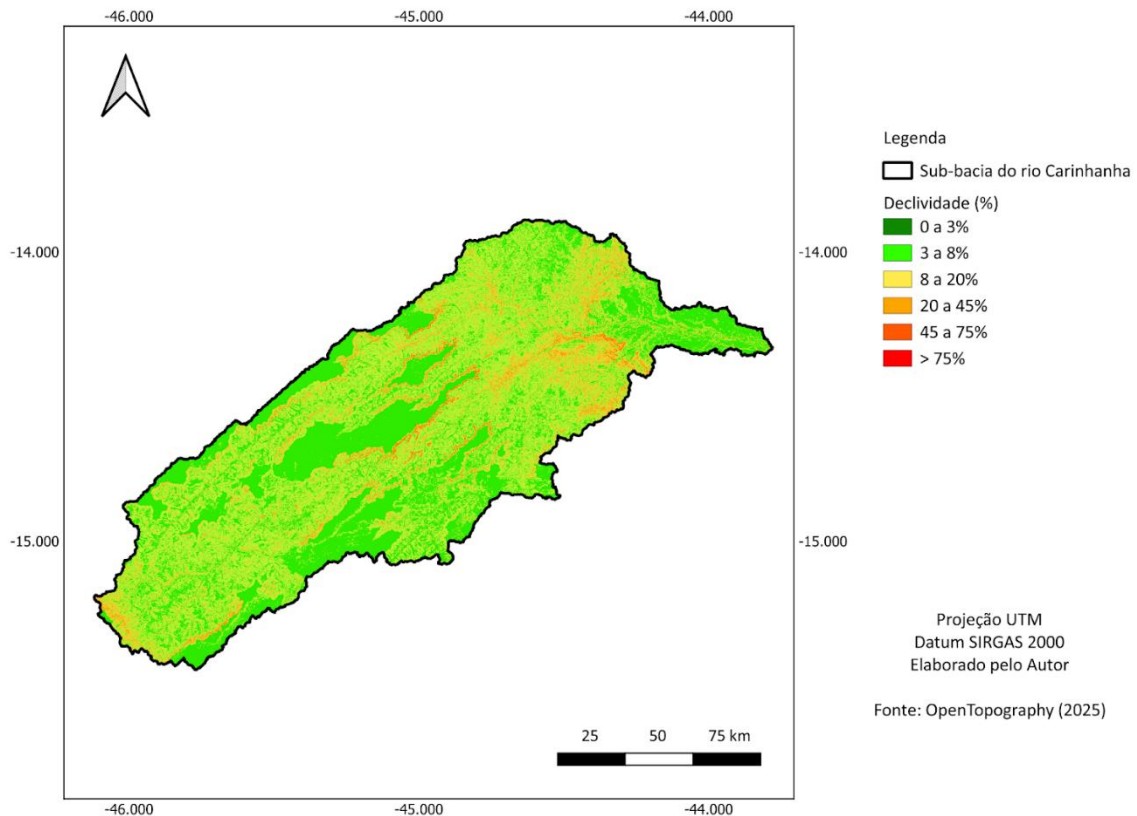
Figura 4 - Mapa altimétrico da sub-bacia do rio Carinhanha



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

A distribuição das declividades, apresentada na Figura 5, evidencia o predomínio de áreas com inclinação entre 3% e 8%, sobretudo ao longo das planícies fluviais. Já as classes de declividade entre 8% e 20% ocorrem nas áreas de transição entre as zonas mais elevadas e os vales encaixados. Porções restritas da bacia, principalmente nas bordas sudoeste e em setores montanhosos, apresentam declividades superiores a 20%.

Figura 5 - Mapa de declividade da sub-bacia do rio Carinhanha



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

4.1.4. Uso e ocupação do solo

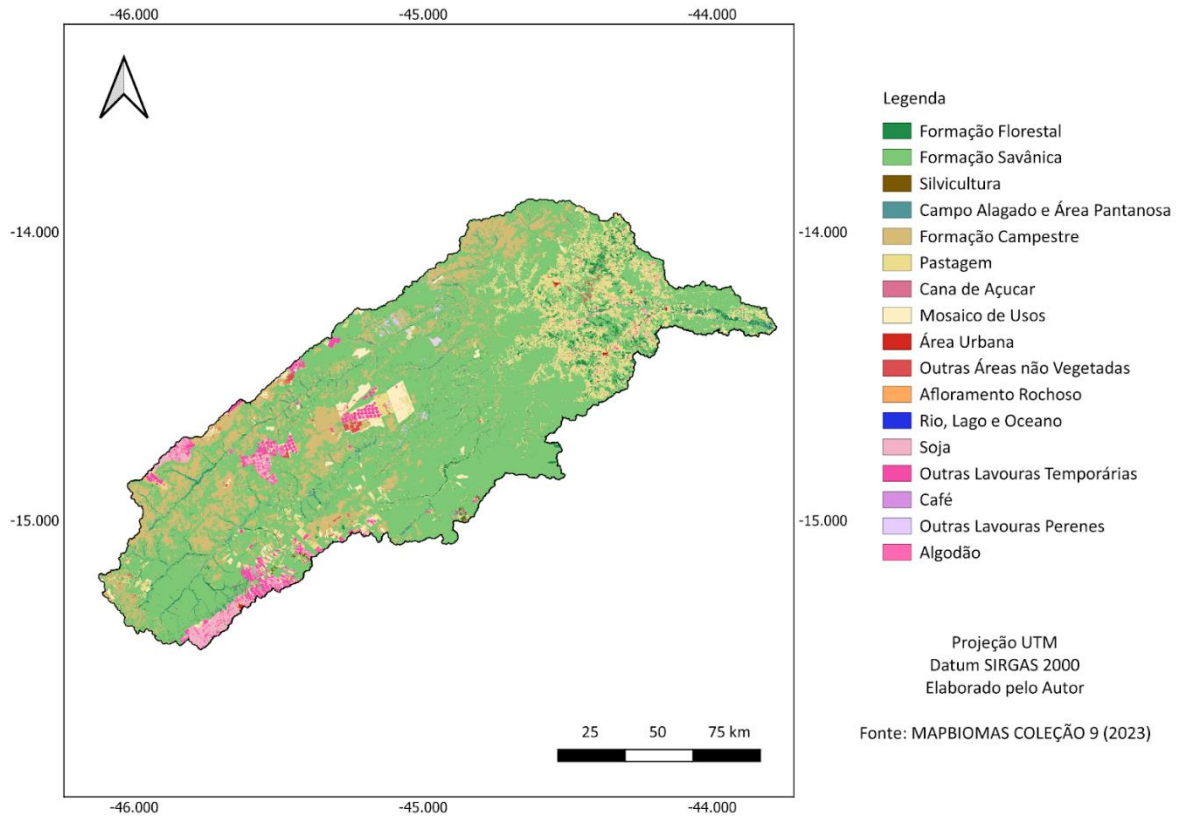
A caracterização do uso e ocupação do solo na sub-bacia do rio Carinhanha indica a coexistência de diferentes classes de cobertura da terra, com predomínio de áreas classificadas como vegetação nativa e presença relevante de usos antrópicos, especialmente associados às atividades agropecuárias. Essa configuração evidencia um mosaico espacial no qual áreas preservadas e áreas transformadas se distribuem ao longo do território da sub-bacia, variando conforme os setores analisados e a proximidade com a rede hidrográfica.

Conforme apresentado na Figura 6, observa-se que as classes antrópicas não se distribuem de forma homogênea, concentrando-se em porções específicas, enquanto a vegetação nativa ocupa áreas contínuas em diferentes trechos da sub-bacia. A leitura conjunta do mapa permite compreender a organização espacial da cobertura da terra no contexto da área de estudo e sua relação com o recorte territorial adotado.

Além de contribuir para a caracterização territorial da sub-bacia, o mapa de uso e ocupação do solo também subsidiou a definição de parâmetros hidráulicos empregados na modelagem, especialmente na atribuição dos coeficientes de rugosidade de Manning às

diferentes classes superficiais identificadas. Dessa forma, a representação espacial da cobertura da terra teve papel direto na parametrização do modelo hidrológico, influenciando a estimativa das condições de escoamento simuladas para o trecho urbano analisado.

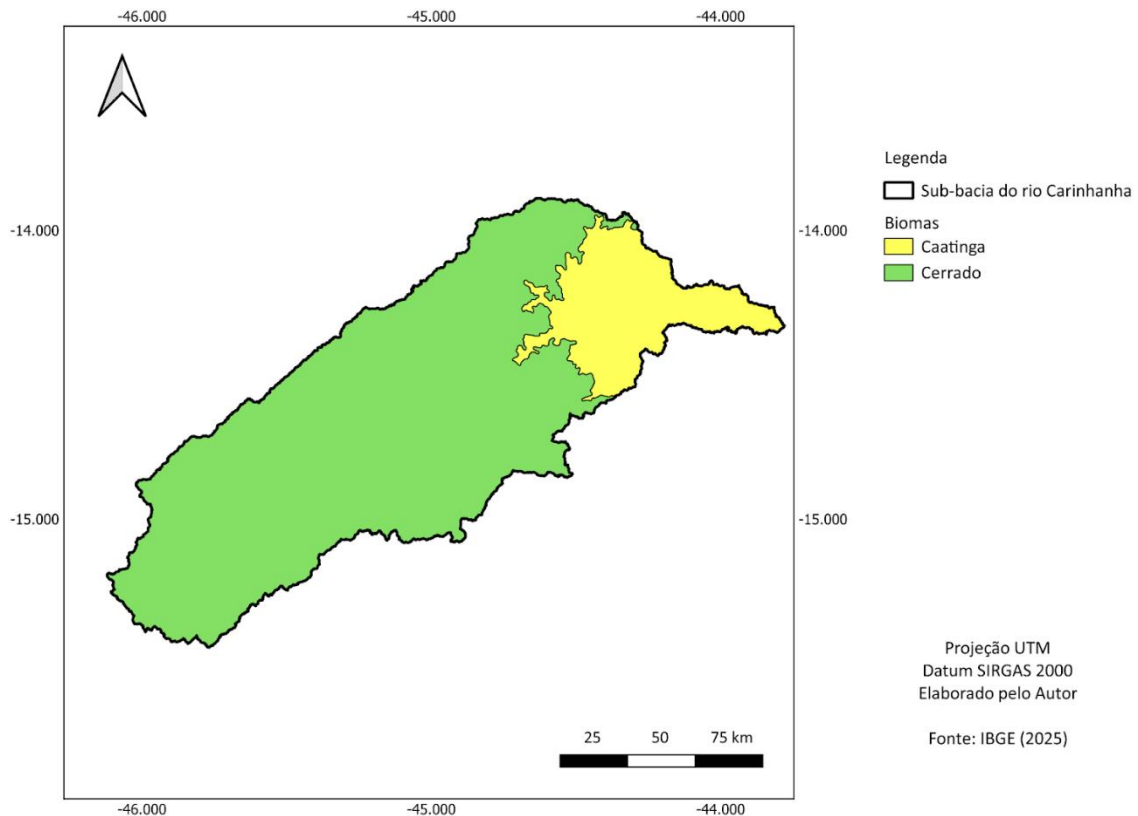
Figura 6 - Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do rio Carinhanha



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Complementarmente, foi elaborado o mapa de biomas da sub-bacia, representado pela Figura 7, com base em dados oficiais do IBGE, evidenciando o predomínio do bioma Cerrado na maior parte da área, com ocorrência secundária da Caatinga mais próxima do exutório da sub-bacia.

Figura 7 - Mapa dos biomas presentes na sub-bacia do rio Carinhanha



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

A literatura evidencia que o uso e ocupação do solo exerce influência direta sobre a resposta hidrológica das bacias hidrográficas. Conforme demonstrado por Martins et al. (2023), alterações na cobertura vegetal, especialmente a substituição da vegetação nativa por atividades agropecuárias, tendem a intensificar o escoamento superficial e modificar o comportamento hidrológico das bacias, afetando a forma como a água é transferida para a rede de drenagem. A redução da cobertura vegetal natural pode comprometer a capacidade de retenção e infiltração da água no solo, favorecendo respostas hidrológicas mais rápidas durante eventos de precipitação intensa.

Além disso, Santos et al. (2020) apontam que mudanças no uso e cobertura do solo afetam diretamente a capacidade de infiltração e o escoamento superficial, influenciando a dinâmica das vazões nos cursos d'água. A conversão da vegetação nativa em pastagens e lavouras, especialmente em áreas próximas aos corpos hídricos, pode resultar na elevação dos picos de vazão em eventos extremos e no aumento da variabilidade do regime fluvial ao longo do ano

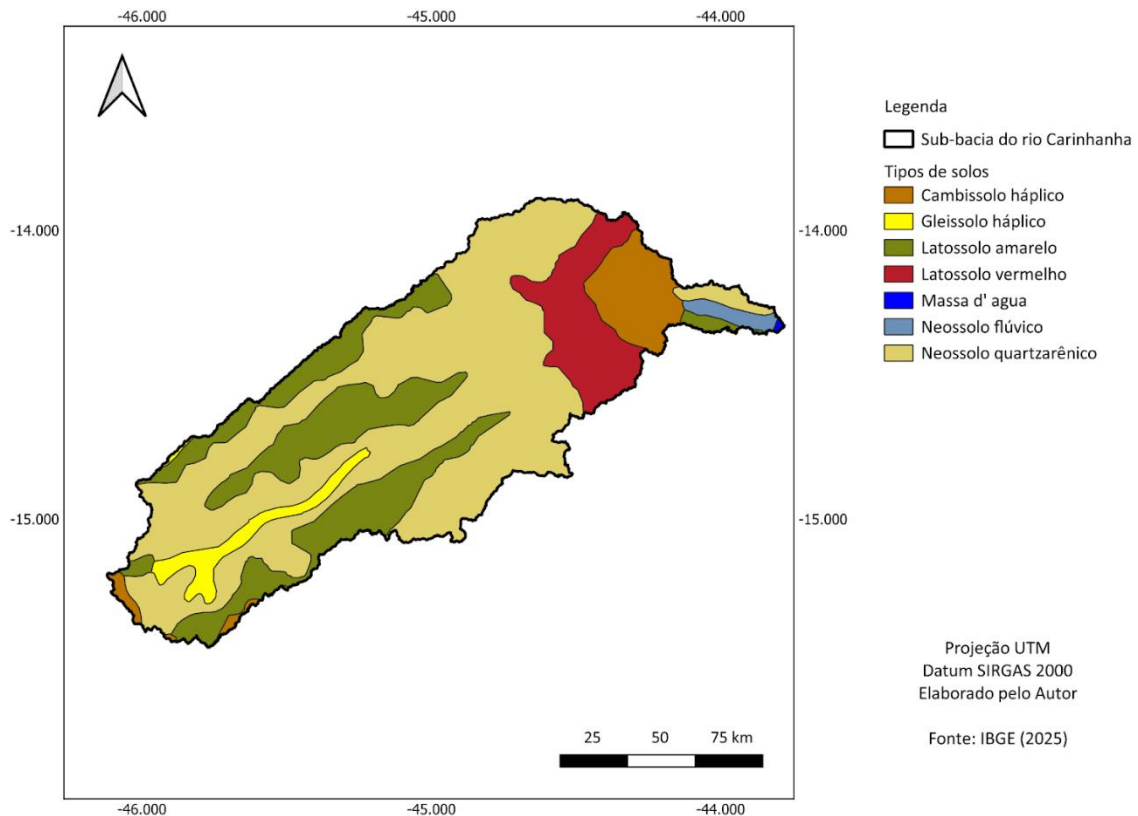
4.1.5. Tipos de solos

A distribuição dos tipos de solos na sub-bacia do rio Carinhanha, apresentada na Figura 8, evidencia a predominância de Neossolos Quartzarênicos, Latossolos Amarelos e Cambissolos Háplicos, com ocorrências secundárias de Gleissolos Háplicos, Latossolos Vermelhos e Neossolos Flúvicos, além de áreas classificadas como massa d'água. Essa configuração demonstra a diversidade pedológica da área de estudo e sua variação espacial ao longo do território da sub-bacia.

Os Neossolos Quartzarênicos caracterizam-se por textura predominantemente arenosa e baixa capacidade de retenção de água, enquanto os Latossolos Amarelos e Vermelhos são solos profundos e bem drenados. Os Cambissolos Háplicos apresentam desenvolvimento intermediário, associados a áreas de relevo mais movimentado, ao passo que Gleissolos Háplicos e Neossolos Flúvicos ocorrem principalmente em ambientes com maior influência hídrica, como planícies aluviais (EMBRAPA, 2023).

Além de compor a caracterização físico-ambiental da sub-bacia, a identificação dos tipos de solo também contribuiu para a definição dos parâmetros de rugosidade utilizados na modelagem hidrológica. As propriedades físicas associadas às diferentes classes pedológicas foram consideradas na atribuição dos coeficientes de Manning, uma vez que influenciam as condições superficiais e o comportamento do escoamento nas áreas adjacentes ao canal modelado.

Figura 8 - Tipos de solos presentes na sub-bacia do rio Carinhanha



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

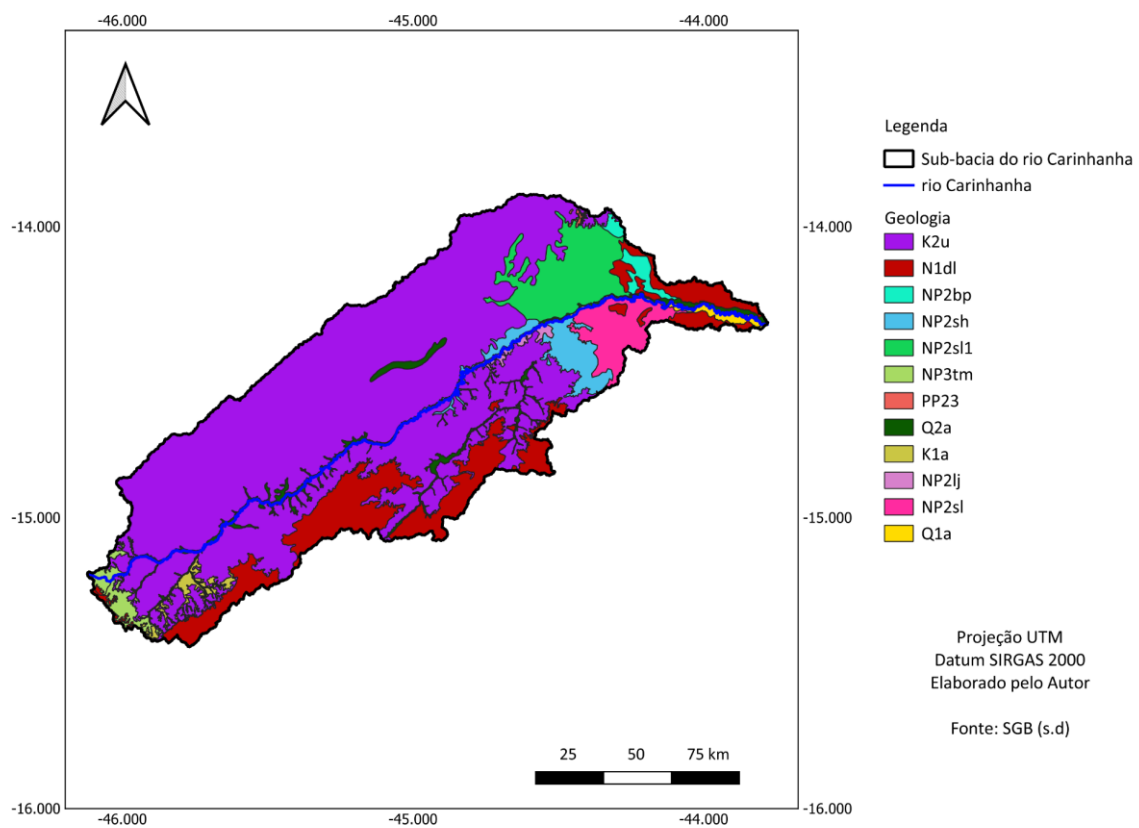
4.1.6. Geologia

A sub-bacia do rio Carinhanha apresenta diversidade geológica significativa, com ocorrência de depósitos superficiais quaternários e unidades sedimentares e ígneas consolidadas de idades proterozoica e mesozoica. A distribuição espacial dessas unidades pode ser observada no mapa geológico apresentado na Figura 9, evidenciando a heterogeneidade estrutural e litológica da área de estudo (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, s.d.).

Entre as formações mais recentes destacam-se os Depósitos Aluvionares Recentes (Q2a) e Antigos (Q1a), associados às planícies e terraços fluviais, compostos por materiais inconsolidados. Também ocorrem coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (N1dl), distribuídas principalmente em áreas de vertente. No conjunto das rochas consolidadas, sobressaem as unidades sedimentares dos Grupos Urucuia (K2u) e Areado (K1a), bem como formações neoproterozoicas compostas predominantemente por rochas carbonáticas e siliciclásticas, além do Granito Correntina (PP23), de natureza ígnea (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, s.d.).

Essa diversidade litológica implica variações nas propriedades físicas do substrato, como porosidade, permeabilidade e resistência mecânica, que influenciam as condições de drenagem, o encaixamento do canal e a configuração morfológica do vale. No contexto deste estudo, a caracterização geológica também contribuiu para a definição dos parâmetros de rugosidade empregados na modelagem hidrológica, uma vez que as características do leito e das margens, condicionadas pelo tipo de material geológico predominante, foram consideradas na atribuição dos coeficientes de Manning ao trecho modelado.

Figura 9 - Geodiversidade da área de estudo



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

4.2. Escolha do Trecho de Estudo

A partir da análise espacial realizada ao longo do rio Carinhanha, foi definido como área de estudo o trecho que atravessa a zona urbana do município de Juvenília, localizado no extremo norte do estado de Minas Gerais, na mesorregião do Norte de Minas e microrregião de Januária. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Juvenília possui população estimada em aproximadamente 5.789 habitantes, distribuídos em uma área territorial de cerca de 1.064,7 km², o que resulta em baixa densidade demográfica quando comparada a

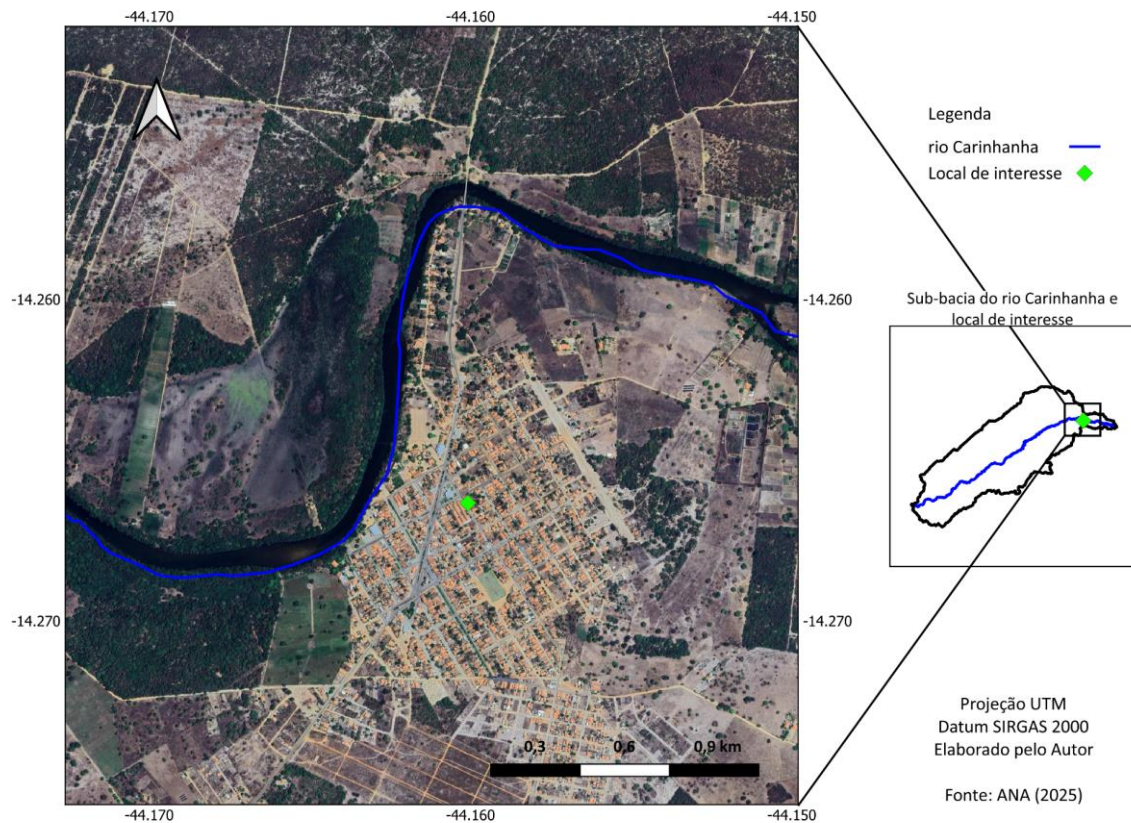
outros municípios da região (IBGE, 2024). A malha urbana apresenta extensão relativamente reduzida e encontra-se implantada majoritariamente próxima às margens do rio Carinhanha, evidenciando uma relação direta entre o crescimento urbano e o sistema fluvial.

A delimitação do trecho estudado, apresentada na Figura 10, evidencia a interação direta entre o canal fluvial e o tecido urbano consolidado, destacando-se como um dos poucos segmentos do rio Carinhanha que atravessam uma área urbana municipal. Essa condição confere maior relevância à análise sob a perspectiva da gestão de riscos hidrológicos, uma vez que a proximidade entre o rio e as áreas ocupadas amplia o potencial de impactos associados a eventos de inundação, conforme discutido na literatura sobre planejamento urbano em áreas ribeirinhas (Tucci, 2013; Brasil, 2016).

Outro fator determinante para a escolha do trecho foi a existência, nas proximidades imediatas, de uma estação fluviométrica com série histórica de vazões consistente e de longa duração, disponibilizada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). A disponibilidade desses dados possibilita a melhor definição de vazões de projeto, reduzindo incertezas associadas às condições de contorno do modelo hidrológico (WMO, 2008; ANA, 2020).

Dessa forma, o trecho urbano do rio Carinhanha em Juvenília reúne simultaneamente relevância socioespacial, em função da proximidade entre o canal e a área urbana, e adequada disponibilidade de dados hidrológicos, configurando-se como um setor estratégico para a aplicação da modelagem hidrológica e para a análise das áreas suscetíveis à inundação.

Figura 10 - Trecho escolhido para modelagem



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

4.3. Etapas da Modelagem Hidráulica

O presente tópico apresenta os procedimentos adotados para o desenvolvimento da modelagem hidráulica e para a delimitação das manchas de inundação no trecho estudado do rio Carinhanha. Inicialmente, são descritas as etapas relacionadas ao tratamento e preparação dos dados utilizados na construção do modelo, incluindo a definição da geometria do canal, a incorporação das informações batimétricas e a configuração das seções transversais. Em seguida, são apresentados os critérios adotados na parametrização do modelo hidráulico e na definição das condições de contorno utilizadas nas simulações. Por fim, são detalhados os procedimentos empregados na execução das simulações e na geração dos mapas de inundação associados aos diferentes cenários hidrológicos analisados.

4.3.1. Análise de Frequência das Vazões e Definição da Estação Fluviométrica

A estimativa das vazões associadas aos diferentes tempos de retorno foi fundamentada na série histórica da estação fluviométrica de Juvenília (código 45260000), operada pelo SGB-

CPRM no rio Carinhanha. Para o presente estudo, foram considerados 60 anos de registros válidos (1964 a 2023), que constituíram a base da análise probabilística de cheias.

A partir dessa base, a série de máximos anuais (AMAX) revelou comportamento compatível com séries hidrológicas de extremos, permitindo a aplicação de modelos probabilísticos voltados à estimativa das vazões de projeto empregadas nas simulações (WMO, 2008; Tucci, 2013).

Com isso, a análise estatística descritiva evidenciou assimetria positiva, comportamento típico de séries de vazões máximas, nas quais poucos eventos extremos apresentam magnitudes significativamente superior aos valores mais frequentes. Essa característica reforça a inadequação de distribuições simétricas para a representação estatística das cheias, em consonância com resultados reportados por Campos (2022) em estudos de modelagem hidrológica aplicada à análise de inundações.

Os testes de Grubbs & Beck e de assimetria não identificaram valores discrepantes na série analisada, indicando que os eventos extremos observados são estatisticamente consistentes e hidrológicamente plausíveis. A manutenção desses valores é fundamental em estudos de cheias, uma vez que eventos extremos reais desempenham papel central na caracterização do risco hidrológico (WMO, 2008).

Na sequência, procedeu-se à avaliação do ajuste de diferentes distribuições de probabilidade à série de máximos anuais, incluindo as distribuições Normal, LogNormal, Gumbel, Exponencial, Pearson tipo III, Log-Pearson tipo III, *Generalized Extreme Value* (GEV) e *Generalized Pareto* (GPA). O desempenho foi avaliado por meio dos testes de Filliben e da Variância, conforme implementado no software SEAF, cujos resultados e respectivas decisões de aderência são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Síntese dos testes de ajuste e decisão final por distribuição probabilística

| Distribuição | Filliben R (90%) | Filliben R | Resultado Filliben | Variância Z | Resultado Variância | Situação final |
|----------------------|------------------|---------------|-----------------------|---------------|---------------------|------------------------|
| Normal | 0,9842 | 0,9727 | Reprovada (R < Rcrit) | 2,7548 | Reprovada | Descartada (Z) |
| LogNormal | 0,9842 | 0,9940 | Aprovada | 0,2941 | Aprovada | Candidata |
| Gumbel | 0,9756 | 0,9932 | Aprovada | 0,2753 | Aprovada | Candidata |
| Exponencial | 0,9689 | 0,9718 | Aprovada | 2,8243 | Reprovada | Descartada (Z) |
| Pearson tipo III | 0,9860 | 0,9944 | Aprovada | 0,8150 | Aprovada | Candidata |
| Log-Pearson tipo III | 0,9885 | 0,9944 | Aprovada | 1,4508 | Aprovada | Candidata forte |
| GEV | 0,9852 | 0,9937 | Aprovada | 1,0765 | Aprovada | Selecionada |
| GPA | 0,9907 | 0,9894 | Reprovada (R < Rcrit) | 1,0451 | Aprovada | Descartada (aderência) |

Fonte: Adaptado de SEAF (CÂNDIDO, 2003)

Os resultados indicaram desempenho insatisfatório das distribuições Normal e Exponencial, que foram descartadas por não atenderem aos critérios de aderência estabelecidos. Esse resultado é coerente com o comportamento assimétrico da série AMAX, uma vez que tais distribuições apresentam limitações na representação de caudas superiores de séries de cheias. Entre as distribuições restantes, destacaram-se a Log-Pearson tipo III e a GEV, ambas apresentando desempenho estatístico satisfatório nos testes aplicados.

A comparação detalhada entre as distribuições Log-Pearson tipo III e GEV, apresentada na Tabela 4, evidenciou que ambas fornecem estimativas semelhantes para tempos de retorno os tempos de retorno definidos.

Tabela 4 - Comparação das vazões estimadas pelas distribuições Log-Pearson tipo III e GEV

| Distribuição | Q2 (m³/s) | Q5 (m³/s) | Q10 (m³/s) | Q50 (m³/s) | Q100 (m³/s) |
|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Log-Pearson tipo III | 301,04 | 396,92 | 460,05 | 599,176 | 658,79 |
| GEV | 302,21 | 396,70 | 457,683 | 587,616 | 640,824 |

Fonte: Adaptado de SEAF (CÂNDIDO, 2003)

A escolha da distribuição GEV também encontra respaldo na literatura técnica recente. Campos (2022), ao analisar vazões máximas anuais para fins de modelagem hidrológica no software HEC-RAS, identificou a GEV como a distribuição mais adequada para representar eventos extremos, especialmente em séries com assimetria positiva e ausência de valores discrepantes significativos. Dessa forma, a adoção da GEV neste estudo é sustentada tanto pelos resultados estatísticos obtidos quanto por evidências reportadas em trabalhos similares.

Assim, a distribuição GEV foi adotada para a estimativa final das vazões de projeto associadas aos tempos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos, as quais foram utilizadas como condição de contorno de vazão nas simulações realizadas no software HEC-RAS.

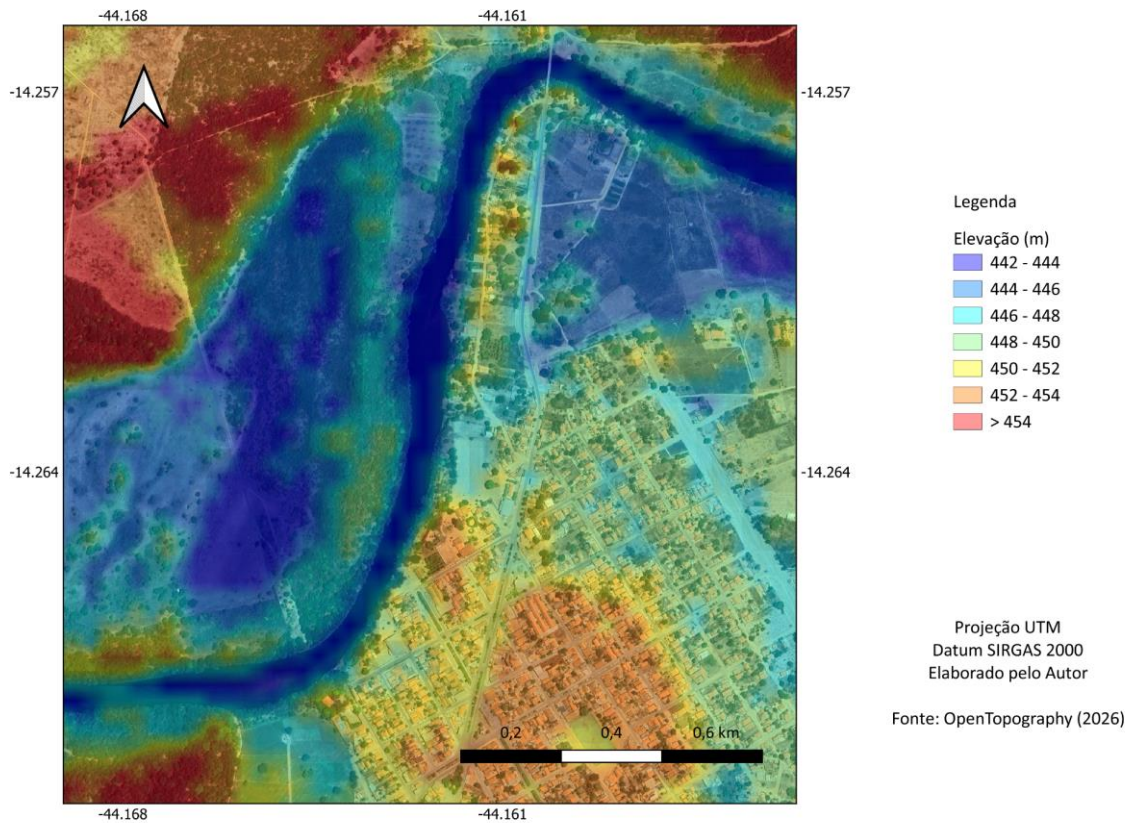
4.3.2. Geométrica do Canal e da Planície de Inundação

A caracterização geométrica do canal e da planície de inundação no trecho urbano do rio Carinhanha, no município de Juvenília, constituiu uma etapa fundamental para a modelagem hidrológica, uma vez que a geometria adotada controla diretamente a distribuição espacial das lâminas d'água simuladas e o comportamento do escoamento durante eventos de cheia. Para a construção dessa geometria, foi empregada uma abordagem integrada, combinando a topografia do terreno adjacente ao rio com a reconstrução do leito fluvial a partir de dados batimétricos.

A topografia externa ao canal, incluindo margens e planície de inundação, foi representada por meio do Modelo Digital de Elevação Copernicus Global DEM, com resolução espacial de 30 m. Esse conjunto de dados permitiu caracterizar as variações altimétricas laterais ao longo do trecho estudado, fundamentais para a simulação do extravasamento do canal no HEC-RAS. Como ilustra a Figura 11, observa-se que o rio Carinhanha encontra-se inserido em uma planície relativamente baixa e contínua, enquanto a porção mais densamente urbanizada do município apresenta cotas superiores. Essa diferença altimétrica evidencia a existência de um desnível topográfico entre a planície de inundação imediata do rio e o núcleo urbano mais

consolidado, aspecto relevante para a compreensão do comportamento hidráulico do trecho modelado.

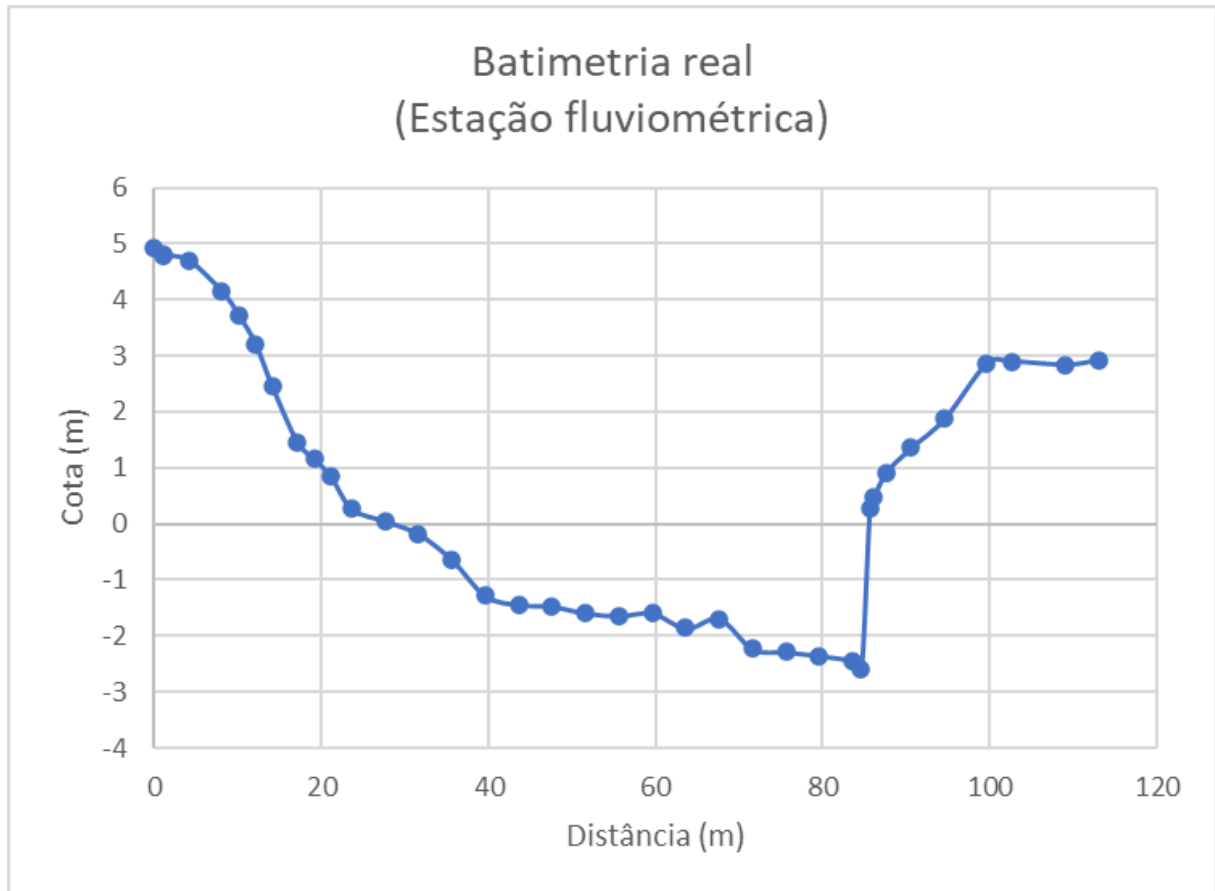
Figura 11 - Mapa altimétrico do trecho estudado (sem batimetria incorporada)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

A geometria submersa do canal principal foi reconstruída com base no perfil batimétrico disponível na estação fluviométrica selecionada, correspondente a um levantamento realizado em 12 de agosto de 2019. A Figura 12 apresenta o perfil batimétrico real obtido nessa estação, expresso originalmente em profundidades relativas ao nível de referência da régua fluviométrica. Esse levantamento constitui a única informação direta disponível sobre a configuração do leito naquele ponto do trecho analisado, uma vez que não há dados batimétricos contínuos que cubram toda a extensão do segmento modelado.

Figura 12 - Batimetria real obtida da estação fluviométrica

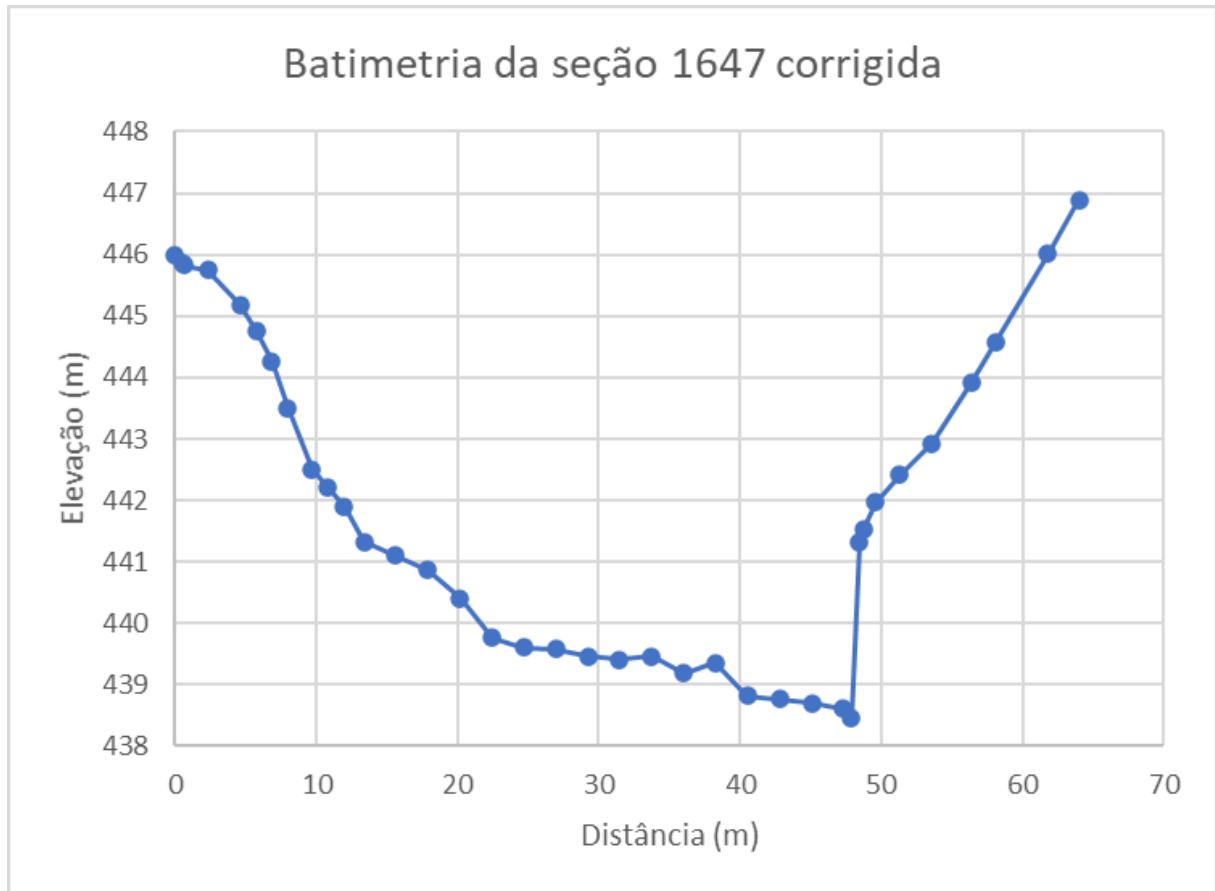


Fonte: ANA (2020)

Diante dessa limitação, tornou-se necessário adotar procedimentos de ajuste e adaptação da batimetria, de modo a viabilizar sua aplicação ao longo de todas as seções transversais do modelo hidrológico. O perfil batimétrico original foi, portanto, ajustado vertical e horizontalmente para compatibilização com o sistema altimétrico do terreno e com as larguras variáveis das seções, conforme descrito no capítulo de metodologia. Esse procedimento permitiu estender a informação batimétrica disponível para todo o trecho estudado, mantendo a coerência geométrica com a topografia adjacente.

Com isso, a Figura 13 ilustra um exemplo da batimetria de uma seção transversal correspondente à primeira seção a montante do trecho modelado (ID 1647) após a aplicação dos ajustes, já expressa em cotas absolutas. A comparação visual entre as Figuras 12 e 13 evidencia que, apesar das transformações aplicadas, o perfil ajustado preserva as principais características geométricas da batimetria real, como a assimetria do canal, a posição do talvegue e a inclinação diferenciada das margens.

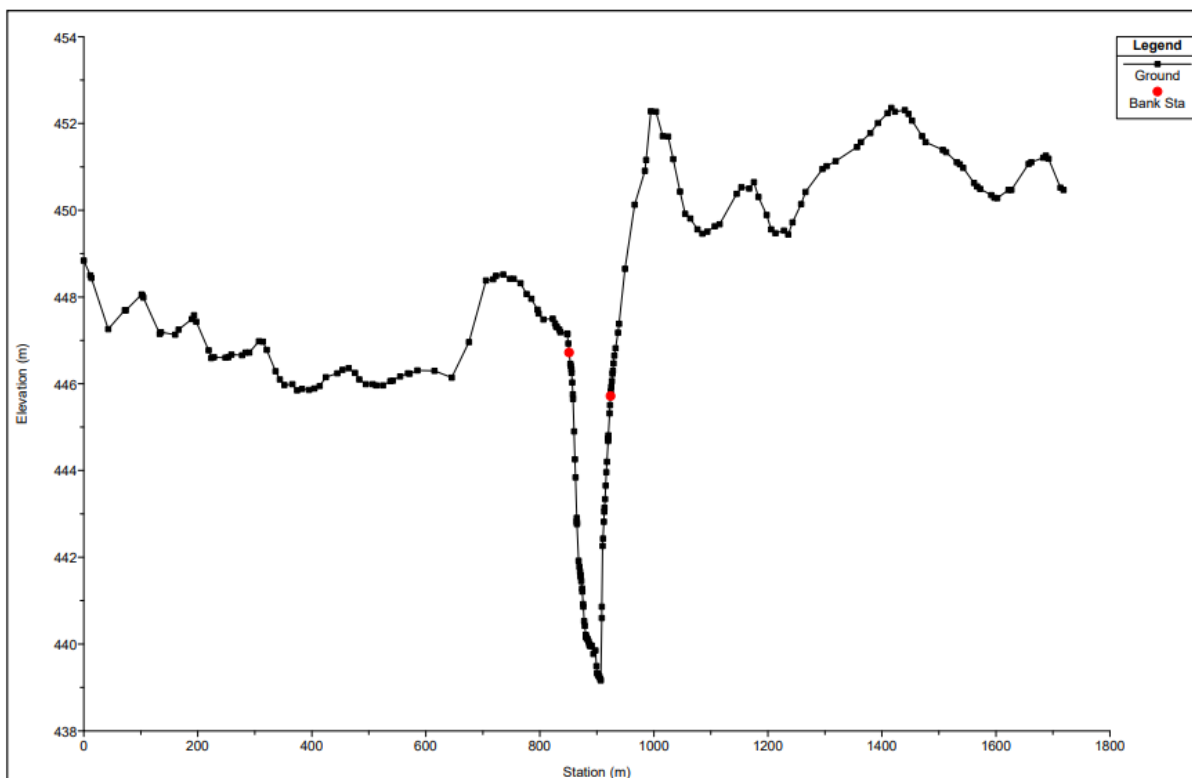
Figura 13 - Batimetria da seção 1647 corrigida



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Por fim, como forma de exemplificar a geometria adotada no modelo hidrológico, apresenta-se na Figura 14 a mesma seção transversal, mas agora completa, a qual representa o resultado direto do procedimento metodológico de integração entre a batimetria do canal e a topografia do terreno adjacente. Essa seção foi obtida a partir do Modelo Digital de Elevação do leito fluvial gerado no RAS Mapper, conforme descrito na metodologia. No perfil apresentado, é possível observar de forma integrada a geometria do leito do canal principal e a configuração da planície de inundação.

Figura 14 - Seção transversal 1647 completa



Fonte: Adaptado de HEC-RAS (2026)

Portanto, embora a metodologia adotada apresente limitações inerentes à escassez de dados batimétricos ao longo de todo o trecho modelado, os resultados obtidos indicam que o procedimento de ajuste permitiu reproduzir de forma visualmente consistente a geometria média do canal. Dessa forma, a integração entre a batimetria ajustada e a topografia do terreno resultou em seções transversais contínuas e semelhantes a real, sendo adequadas à aplicação da modelagem hidrológica e à análise das manchas de inundação.

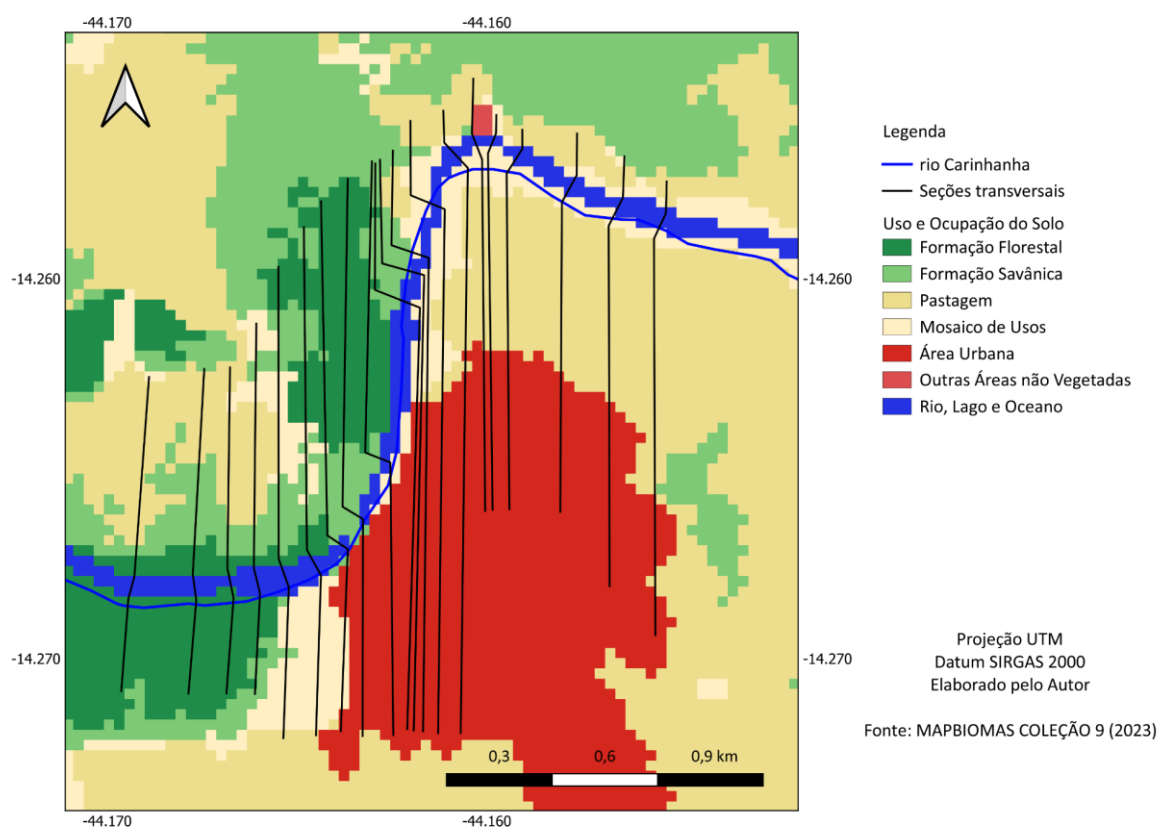
4.3.3. Definição do Coeficiente de Rugosidade de Manning

A resistência ao escoamento no trecho estudado do rio Carinhanha foi representada por meio do coeficiente de rugosidade de Manning, cujos valores foram definidos de acordo com as características observadas do leito, das margens e da planície adjacente ao canal. Os coeficientes atribuídos refletem a condição de canal natural predominante no trecho modelado, considerando a presença de irregularidades geométricas e vegetação marginal, situando-se dentro das faixas usualmente indicadas na literatura técnica para cursos d'água com características semelhantes (Chow, 1959).

A determinação dos parâmetros n_3 (obstruções) e n_4 (vegetação) foi orientada pela caracterização espacial do uso e ocupação do solo na planície inundável. Para isso, as seções

transversais foram sobrepostas ao mapa temático de uso do solo em ambiente SIG, possibilitando a identificação das classes interceptadas por cada seção (margem esquerda, canal e margem direita) e a quantificação de sua participação relativa. Como ilustra a Figura 15, o trecho apresenta predominância de classes como pastagem e formação savânica, além de áreas de formação florestal (associadas ao bioma Caatinga) e da mancha urbana do município, as quais tendem a introduzir maiores resistências ao escoamento quando presentes na planície de inundação.

Figura 15 - Mapa de uso e ocupação do solo do trecho estudado



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

A partir daí foram definidos os parâmetros. O parâmetro n_0 , associado ao material em contato direto com o escoamento, foi definido a partir da análise do mapa de tipos de solo e do mapa geológico da região de estudo, apresentados nos itens 4.1.5 e 4.1.6, respectivamente. O mapeamento pedológico, segundo a EMBRAPA (2023), indica a predominância de Cambissolo Háplico Argiloso no entorno do trecho analisado, enquanto a caracterização geológica evidencia a ocorrência das unidades Depósitos Aluvionares Antigos (Q1a) e Depósitos Aluvionares Recentes (Q2a) no leito e nas margens imediatas do canal, com presença pontual

da Formação Sete Lagoas (NP2sl) nas proximidades, conforme dados disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB, s.d.). Essas unidades aluvionares são constituídas por material inconsolidado de origem fluvial, composto por cascalho, areia e frações finas, o que indica que, apesar da classificação pedológica regional, o leito ativo do rio Carinhanha apresenta composição granulométrica heterogênea, com possibilidade de exposição de frações mais grosseiras durante eventos de cheia. Em função dessas características, foi adotado o valor de $n_0=0,024$, correspondente à classe de pedregulho fino, valor compatível com canais aluviais formados por sedimentos inconsolidados de granulometria mista.

O parâmetro n_1 , relacionado às irregularidades do canal, foi definido considerando a morfologia observada ao longo do trecho, caracterizada por um canal natural, sinuoso, com presença de bancos de areia, pequenas assimetrias nas margens e ausência de revestimento artificial contínuo. Esses elementos indicam irregularidades típicas de rios naturais, porém sem feições extremas que caracterizassem irregularidade severa. Dessa forma, foi adotado o valor $n_1=0,010$, correspondente a um grau moderado de irregularidade, coerente com as feições observadas nas imagens orbitais e na geometria construída no modelo.

O parâmetro n_2 , associado às variações da seção transversal, foi definido a partir da análise do conjunto de seções ao longo do trecho modelado. Observou-se que, apesar de existirem variações de largura e forma entre seções consecutivas, essas mudanças ocorrem de maneira gradual, acompanhando a planície de inundação e o traçado do canal, sem alternâncias abruptas ou frequentes. Em função disso, adotou-se $n_2=0,005$, valor correspondente a alternâncias ocasionais da seção, refletindo adequadamente a variabilidade geométrica observada.

Os parâmetros n_3 (efeito de obstruções) e n_4 (influência da vegetação) apresentaram variabilidade espacial entre as seções transversais, pois dependem diretamente do uso e ocupação do solo interceptado por cada seção. A partir da sobreposição das seções ao mapa de uso e ocupação do solo, foram identificadas as classes predominantes ao longo das margens e da planície de inundação, tais como pastagem, formação savânica, formação florestal e área urbana. Para cada seção, os valores de n_3 e n_4 foram obtidos por média ponderada, considerando os comprimentos interceptados por cada classe, o que permitiu sintetizar, em um único valor, a influência combinada das diferentes coberturas presentes ao longo de cada seção.

Como resultado desse procedimento, os valores de n_3 variaram aproximadamente entre 0,0119 e 0,0180, refletindo o aumento da resistência ao escoamento em seções com maior participação relativa de áreas florestadas e urbanizadas, onde há maior presença de obstáculos

naturais e antrópicos. De forma semelhante, os valores de n_4 variaram entre 0,0019 e 0,0101, indicando maior influência da vegetação em seções que interceptam formações florestais, e contribuição reduzida em seções dominadas por pastagem, formação savânica ou áreas urbanizadas, nas quais a vegetação em pé é menos expressiva ou fragmentada.

O fator m_5 , associado ao grau de meandrização do canal, foi definido a partir da análise da sinuosidade do trecho e da representação geométrica adotada no modelo hidrológico. A sinuosidade foi calculada como a razão entre o comprimento do canal medido ao longo do eixo do rio e a distância em linha reta entre os pontos inicial e final do trecho, resultando em um valor aproximado de 1,30, característico de um canal sinuoso, com meandros bem desenvolvidos. Entretanto, no modelo HEC-RAS, os comprimentos hidráulicos entre seções foram definidos seguindo o traçado real do canal (*centerline*), o que implica que parte do efeito da sinuosidade já está incorporada na geometria do modelo. Assim, a adoção direta do fator correspondente à meandrização severa poderia levar à superestimação da rugosidade, ao considerar duas vezes o mesmo efeito (na geometria e no coeficiente). Em razão disso, optou-se pela adoção do valor intermediário $m_5=1,15$, correspondente a um grau de meandrização apreciável, garantindo coerência física e maior estabilidade numérica das simulações.

A combinação dos parâmetros por meio da equação de Cowan resultou em valores do coeficiente de Manning variando aproximadamente entre 0,0627 e 0,0773 ao longo das seções analisadas. Observa-se que esses valores não apresentam saltos abruptos entre seções consecutivas, mas sim variações graduais e consistentes com a alternância espacial do uso do solo e da cobertura vegetal ao longo do trecho. Essa continuidade é desejável do ponto de vista hidráulico, pois evita descontinuidades artificiais de resistência ao escoamento que poderiam gerar instabilidades numéricas ou distorções nos perfis de nível d'água simulados.

Com isso, a Tabela 5 apresenta os valores dos parâmetros, bem como o coeficiente de Manning equivalente calculado para cada seção transversal, os quais foram utilizados como dados de entrada nas simulações realizadas no HEC-RAS.

Tabela 5 - Coeficiente de Mannig para cada seção transversal

| Seção ID | n0 | n1 | n2 | n3 | n4 | n5 | n Médio |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 2545 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,0136 | 0,01 | 1,15 | 0,07199 |
| 2364 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,0138 | 0,0103 | 1,15 | 0,072565 |
| 2261 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,0134 | 0,0096 | 1,15 | 0,0713 |
| 2184 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,012 | 0,0076 | 1,15 | 0,06739 |
| 2103 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,0109 | 0,006 | 1,15 | 0,064285 |
| 2011 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,0127 | 0,0087 | 1,15 | 0,06946 |
| 1919 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,018 | 0,0101 | 1,15 | 0,077165 |
| 1823 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,0184 | 0,0098 | 1,15 | 0,07728 |
| 1647 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,0179 | 0,0074 | 1,15 | 0,073945 |
| 1179 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,0147 | 0,0022 | 1,15 | 0,064285 |
| 1090 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,0155 | 0,0019 | 1,15 | 0,06486 |
| 1035 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,0154 | 0,0019 | 1,15 | 0,064745 |
| 883 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,0154 | 0,002 | 1,15 | 0,06486 |
| 728 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,0157 | 0,0019 | 1,15 | 0,06509 |
| 669 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,0144 | 0,0038 | 1,15 | 0,06578 |
| 634 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,014 | 0,0027 | 1,15 | 0,064055 |
| 552 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,0141 | 0,0025 | 1,15 | 0,06394 |
| 376 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,0137 | 0,0028 | 1,15 | 0,063825 |
| 227 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,0143 | 0,0025 | 1,15 | 0,06417 |
| 95 | 0,024 | 0,01 | 0,005 | 0,0119 | 0,0036 | 1,15 | 0,062675 |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

4.3.4. Condições de Contorno Hidráulicas Adotadas no Modelo

A montante do trecho modelado, foram aplicadas como vazões constantes as vazões associadas aos tempos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos, estimadas a partir da distribuição probabilística GEV. A utilização desses cenários permitiu avaliar desde eventos frequentes até cheias extremas, fornecendo uma base consistente para a análise da resposta hidráulica do canal e da planície de inundação no trecho urbano analisado.

A declividade de energia associada a essa condição foi determinada a partir da análise do fundo do canal reconstruído no modelo hidrológico, com base nas seções transversais ajustadas, resultando em um valor médio de 0,0004 m/m. Esse valor encontra-se na ordem de grandeza usualmente associada a rios naturais de planície e baixo gradiente. A literatura clássica de hidráulica, hidrologia e geomorfologia fluvial indica que esses sistemas operam com declividades longitudinais muito reduzidas, tipicamente da ordem de 10^{-4} m/m, podendo atingir valores da ordem de 10^{-3} m/m em determinados trechos, o que torna o valor adotado compatível com as características geomorfológicas do trecho estudado (Chow, 1959; Tucci, 2013; Knighton, 2014).

A aplicação da mesma declividade de energia nas extremidades do domínio justifica-se pela reduzida extensão do trecho modelado, com aproximadamente 2,45 km. Nessas condições, admite-se que a declividade média do canal represente adequadamente a energia do escoamento nas proximidades das extremidades do trecho, hipótese amplamente adotada em estudos de modelagem hidrológica de rios naturais quando há limitação de dados observados de nível d'água (USACE, 2002).

Assim, as condições de contorno hidráulicas definidas permitiram a execução estável das simulações para todos os cenários hidrológicos considerados, constituindo a base para a geração dos perfis longitudinais de nível d'água e das manchas de inundação apresentadas nos tópicos subsequentes.

4.4. Resultados das Simulações

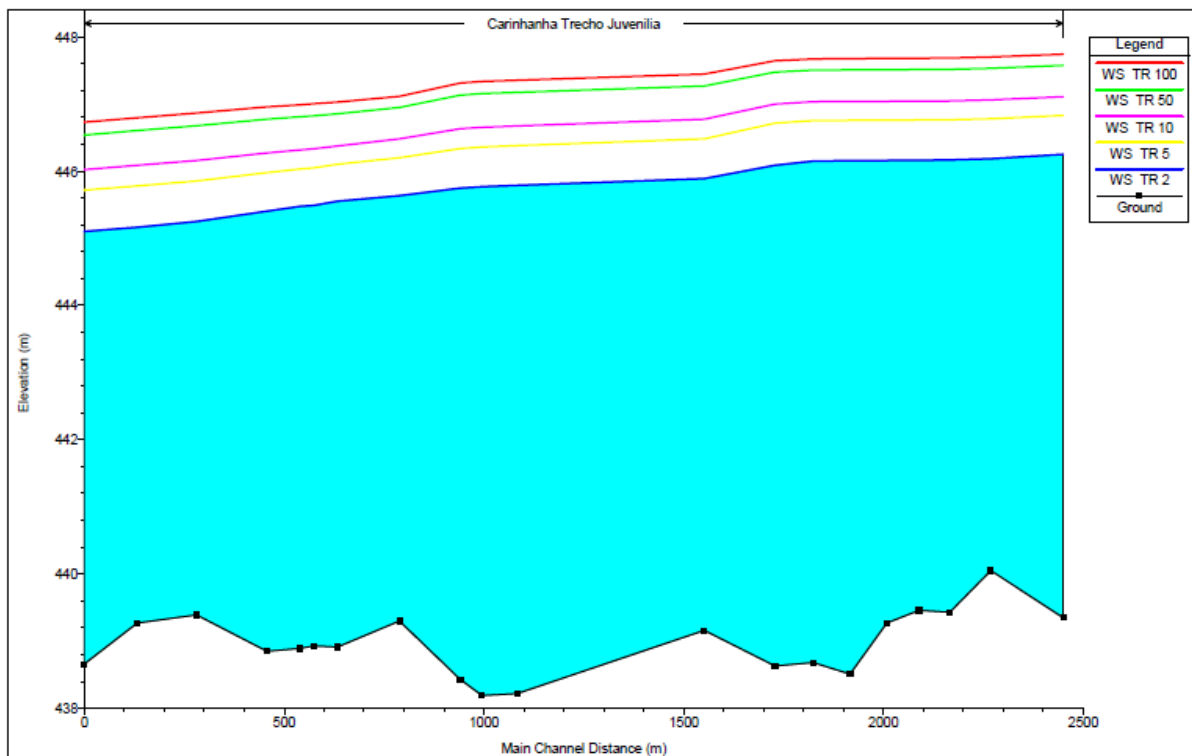
4.4.1. Perfis Longitudinais do Nível d'Água

Neste tópico são apresentados os resultados das simulações a partir da análise dos perfis longitudinais do nível d'água (NA), da velocidade média no canal principal e do número de Froude, obtidos para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos. Os resultados são apresentados na forma de gráficos de perfil longitudinal, exportados do software HEC-RAS, os

quais estão representados no sentido jusante–montante, conforme a convenção adotada pelo modelo. A avaliação conjunta desses parâmetros permite analisar o comportamento hidráulico do trecho estudado do rio Carinhanha, bem como o regime de escoamento associado aos diferentes cenários de cheia.

Os perfis longitudinais do nível d'água (NA), apresentados na Figura 16, indicam que, para todos os cenários analisados, ocorre uma elevação gradual da lâmina d'água no sentido montante, acompanhando a declividade longitudinal do fundo do canal. Com o aumento do tempo de retorno, observa-se uma elevação progressiva do nível d'água ao longo de todo o trecho, mantendo-se, entretanto, a forma geral dos perfis longitudinais. As diferenças entre os cenários de menores tempos de retorno (TR2 e TR5) são pouco expressivas, enquanto os cenários de TR50 e TR100 apresentam elevações mais significativas, sobretudo nos trechos médios e a montante do domínio modelado. A ausência de descontinuidades abruptas ou inversões do gradiente hidráulico ao longo do perfil indica um comportamento hidráulico estável, associado à geometria hidráulica representada no modelo, incluindo a batimetria corrigida e interpolada ao longo do trecho, o que resulta em perfis de nível d'água fisicamente consistentes em simulações realizadas em regime permanente (Chow, 1959; USACE, 2002).

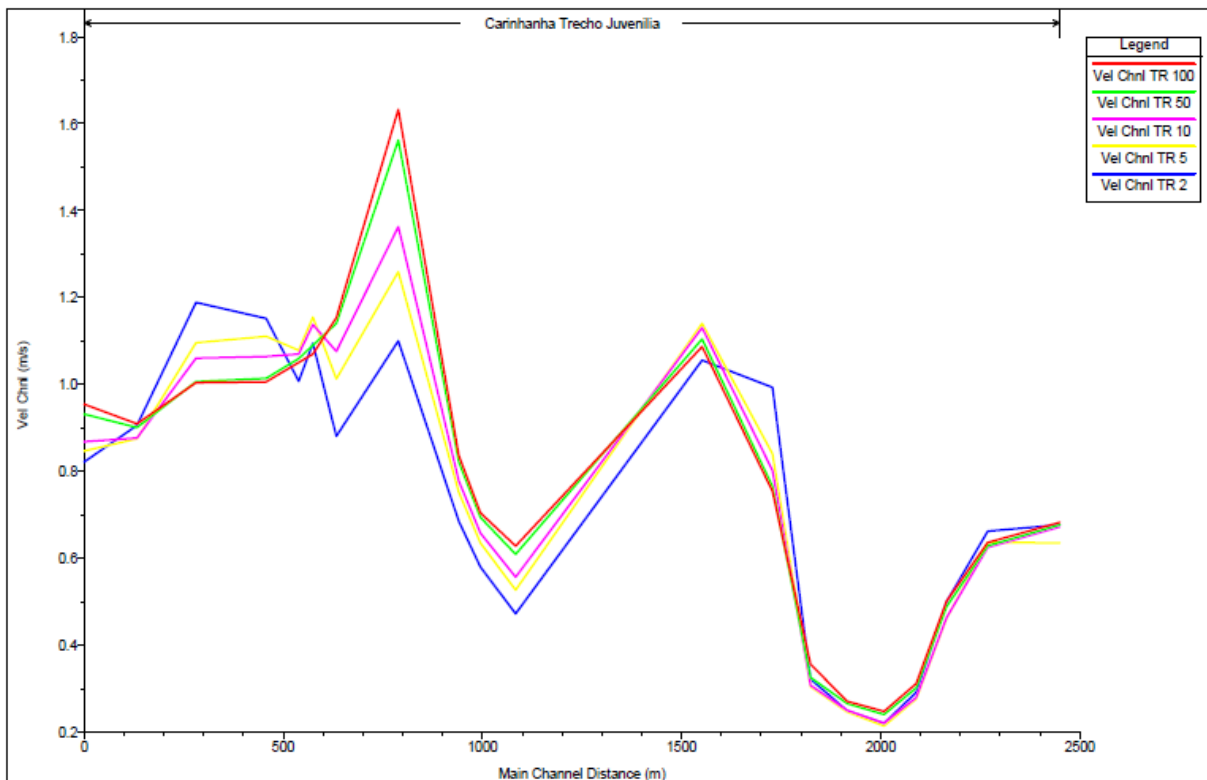
Figura 16 - Perfis longitudinais do nível d'água simulados para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos ao longo do trecho estudado (sentido jusante–montante).



Fonte: Simulação do HEC-RAS (2026)

A resposta hidráulica do trecho também é evidenciada pelos perfis longitudinais de velocidade média no canal principal, apresentados na Figura 17. Observa-se que as velocidades aumentam de forma progressiva com o incremento do tempo de retorno, refletindo diretamente o aumento das vazões aplicadas nas simulações. Apesar desse incremento, os perfis mantêm um padrão semelhante ao longo do trecho, com variações graduais e picos localizados associados às características geométricas do canal e à distribuição da profundidade ao longo das seções. A velocidade máxima simulada, de 1,63 m/s, foi observada no cenário de TR100, enquanto os menores valores ocorrem em trechos específicos do domínio, caracterizando setores de menor energia hidráulica. De modo geral, os valores obtidos permanecem compatíveis com o comportamento esperado em rios naturais de planície e baixo gradiente, nos quais o escoamento tende a apresentar velocidades moderadas mesmo sob condições de cheia (Chow, 1959; USACE, 2002).

Figura 17 - Perfis longitudinais da velocidade média no canal principal para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos (sentido jusante–montante).

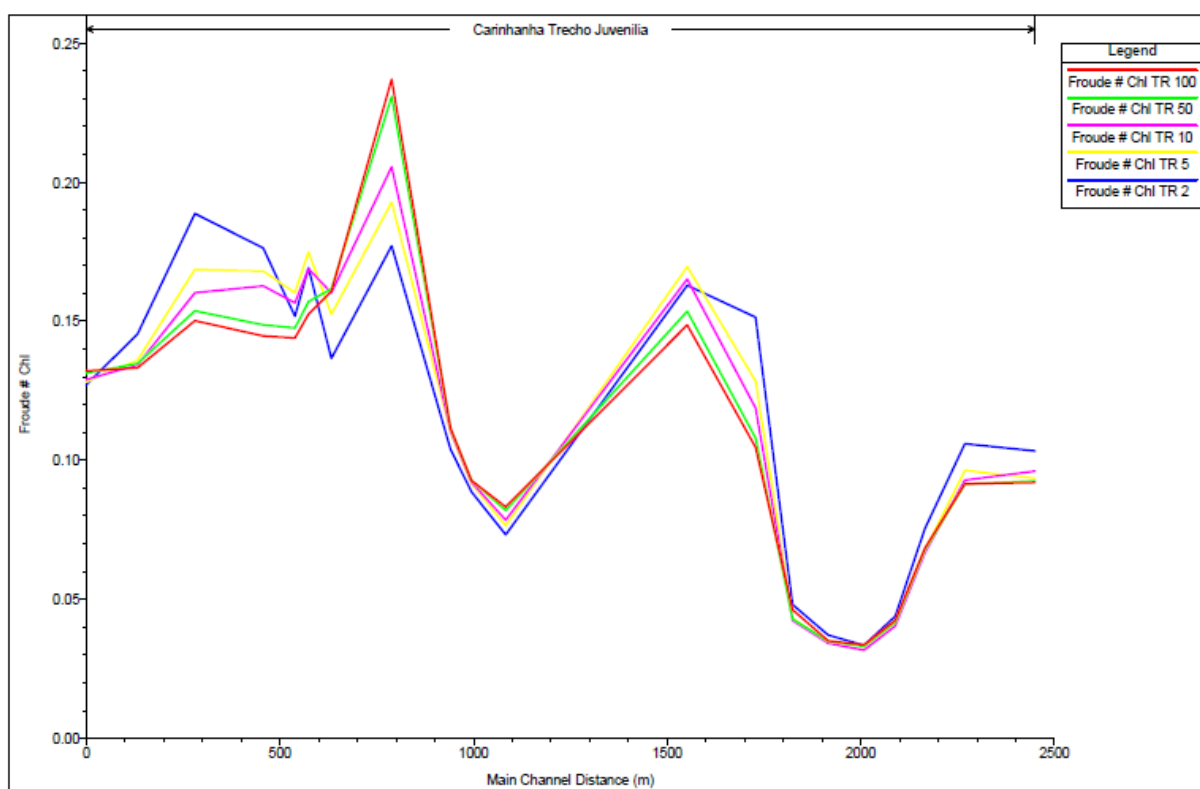


Fonte: Simulação do HEC-RAS (2026)

Complementarmente, o regime de escoamento ao longo do trecho foi avaliado por meio do número de Froude calculado no canal principal, conforme apresentado na Figura 18. Os resultados indicam que, para todos os tempos de retorno analisados, os valores de Froude

permanecem inferiores a 1, caracterizando escoamento em regime subcrítico ao longo de todo o domínio modelado, conforme a classificação clássica de canais abertos (Chow, 1959). O valor máximo de Froude, igual a 0,24, ocorre no cenário de TR100, coincidindo espacialmente com o trecho de maior velocidade, o que evidencia a relação direta entre esses parâmetros hidráulicos, uma vez que o número de Froude é função da velocidade e da profundidade do escoamento. Mesmo nos cenários de maior vazão, a manutenção do regime subcrítico reforça a coerência hidráulica dos resultados e sua compatibilidade com as características de um canal natural de planície e baixo gradiente (USACE, 2002).

Figura 18 - Perfis longitudinais do número de Froude no canal principal para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos (sentido jusante–montante).



Fonte: Simulação do HEC-RAS (2026)

4.4.2. Mapeamento das Áreas Inundáveis e Implicações para o Planejamento Urbano

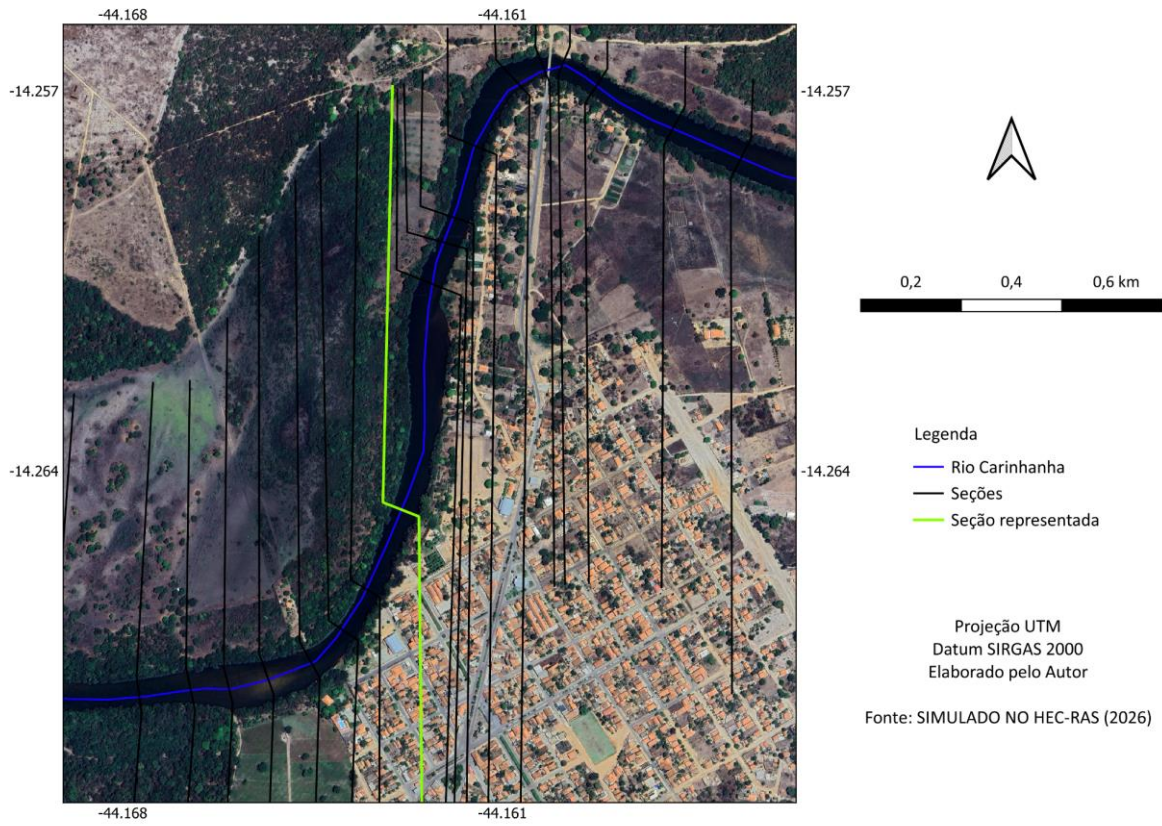
Neste tópico são apresentados os resultados da simulação das inundações no trecho estudado do rio Carinhanha, no município de Juvenília, a partir de uma análise integrada das seções transversais representativas e das manchas de inundação associadas aos tempos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos. Os resultados foram obtidos com o modelo hidrológico HEC-RAS, considerando a geometria do canal e da planície de inundação, as vazões de projeto

estimadas na análise de frequência hidrológica e as condições de contorno previamente definidas.

A apresentação dos resultados busca integrar a leitura hidráulica local, evidenciada nas seções transversais, com a leitura espacial da inundação, representada pelas manchas simuladas para cada cenário hidrológico. Essa integração permite identificar os trechos sujeitos ao extravasamento da calha e as áreas potencialmente afetadas pela inundação, fornecendo subsídios técnicos relevantes para a discussão do planejamento urbano e da gestão de riscos. Considerando as características de municípios de pequeno porte e em processo de expansão urbana, como Juvenília, a delimitação das áreas inundáveis constitui um elemento fundamental para orientar o ordenamento territorial e evitar a ocupação de zonas naturalmente suscetíveis à inundação (Tucci, 2013; Brasil, 2016).

A Figura 19 apresenta a localização da seção transversal selecionada para a análise detalhada do comportamento da inundação no trecho urbano do rio Carinhanha. A escolha dessa seção considerou sua posição estratégica ao longo do trecho modelado, por abranger, de um lado, a margem direita fortemente associada à ocupação urbana existente e, de outro, a margem esquerda caracterizada por áreas rebaixadas adjacentes ao canal, que apresentam comportamento típico de zonas naturalmente inundáveis. Dessa forma, a seção selecionada permite avaliar simultaneamente a interação do escoamento com o meio urbano consolidado e com feições naturais da planície de inundação.

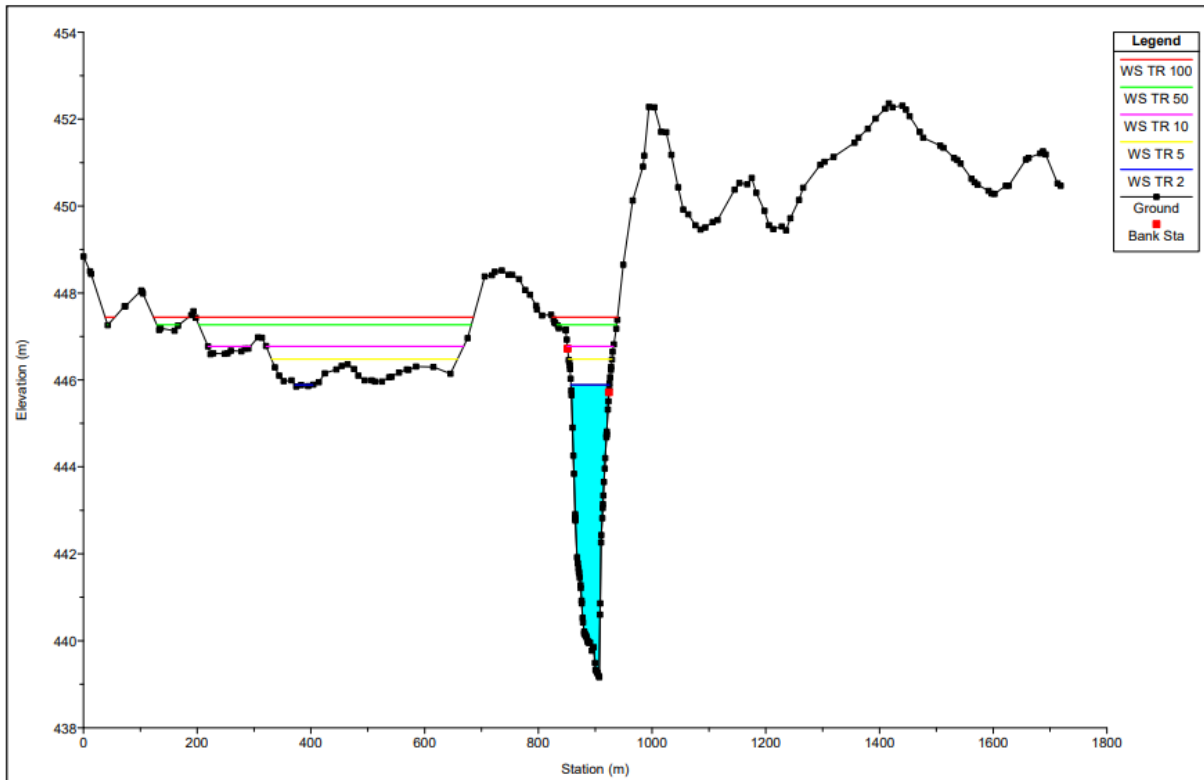
Figura 19 - Localização da seção transversal representativa no trecho estudado



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Na Figura 20 é apresentada a seção transversal representativa, contendo o perfil do terreno e os níveis d'água simulados para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos, plotados conjuntamente. Observa-se que, para os menores tempos de retorno, a lâmina d'água permanece predominantemente contida na calha principal, enquanto, à medida que o tempo de retorno aumenta, ocorre a elevação progressiva do nível d'água e a ampliação da área molhada, com aproximação gradual das margens. Na margem esquerda, a inundação passa a ocupar uma área rebaixada lateral ao canal, assumindo uma configuração semelhante à de uma lagoa marginal.

Figura 20 - Seção transversal representativa com os níveis d'água simulados para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos



Fonte: Simulação do HEC-RAS (2026)

As cotas máximas do nível d'água, expressas em relação ao nível médio do mar, apresentam incremento sistemático com o aumento do tempo de retorno, refletindo diretamente o acréscimo das vazões de projeto aplicadas nas simulações. Ressalta-se que esses valores variam ao longo do trecho modelado em função da declividade longitudinal do rio, com seções situadas mais a montante apresentando cotas absolutas mais elevadas e seções a jusante valores menores. De forma complementar, foi analisada a elevação da lâmina d'água em relação ao fundo do rio, parâmetro diretamente associado à profundidade do escoamento e ao potencial de extravasamento da calha. A Tabela 6 reúne os valores das cotas máximas do nível d'água, tanto em relação ao nível do mar quanto em relação ao fundo do canal, para cada tempo de retorno considerado.

Tabela 6 - Cotas máximas do nível d'água simuladas para diferentes tempos de retorno para a seção representada

| Cenário | Vazão (m ³ /s) | Cota (m) - Nível do mar | Cota (m) - Fundo do rio |
|---------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| TR 2 | 302,21 | 445,89 | 6,73 |
| TR 5 | 396,70 | 446,48 | 7,32 |
| TR 10 | 457,683 | 446,77 | 7,61 |
| TR 50 | 587,616 | 447,27 | 8,11 |
| TR 100 | 640,824 | 447,44 | 8,28 |

Fonte: Adaptado da simulação do HEC-RAS (2026)

As Figuras 21, 22, 23, 24 e 25 apresentam as manchas de inundação simuladas para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos, respectivamente. Observa-se um padrão consistente de expansão progressiva da área inundada com o aumento do tempo de retorno, preservando a tendência de o extravasamento se concentrar predominantemente nas áreas mais baixas adjacentes ao canal, típicas da planície de inundação. Esse comportamento reforça a importância de se analisar os resultados em escala espacial, uma vez que a mancha evidencia não apenas o alargamento da lâmina d'água em torno do rio, mas também os setores com maior propensão à inundação em diferentes cenários de cheia.

De forma geral, os mapas indicam que a inundação tende a ocupar majoritariamente áreas não urbanizadas, incluindo setores com cobertura vegetal e áreas abertas que sugerem usos rurais/agrícolas no entorno imediato do canal. No entanto, ainda que a mancha atinja relativamente poucas edificações quando comparada ao conjunto do tecido urbano, observa-se interferência em pontos sensíveis do território, especialmente nos cenários de maior magnitude. A Figura 26 evidencia com maior clareza a ocorrência de inundação em trecho associado ao sistema viário de acesso e em um pequeno conjunto de ocupações próximas, aspecto relevante por envolver infraestrutura urbana e acessibilidade local durante eventos extremos.

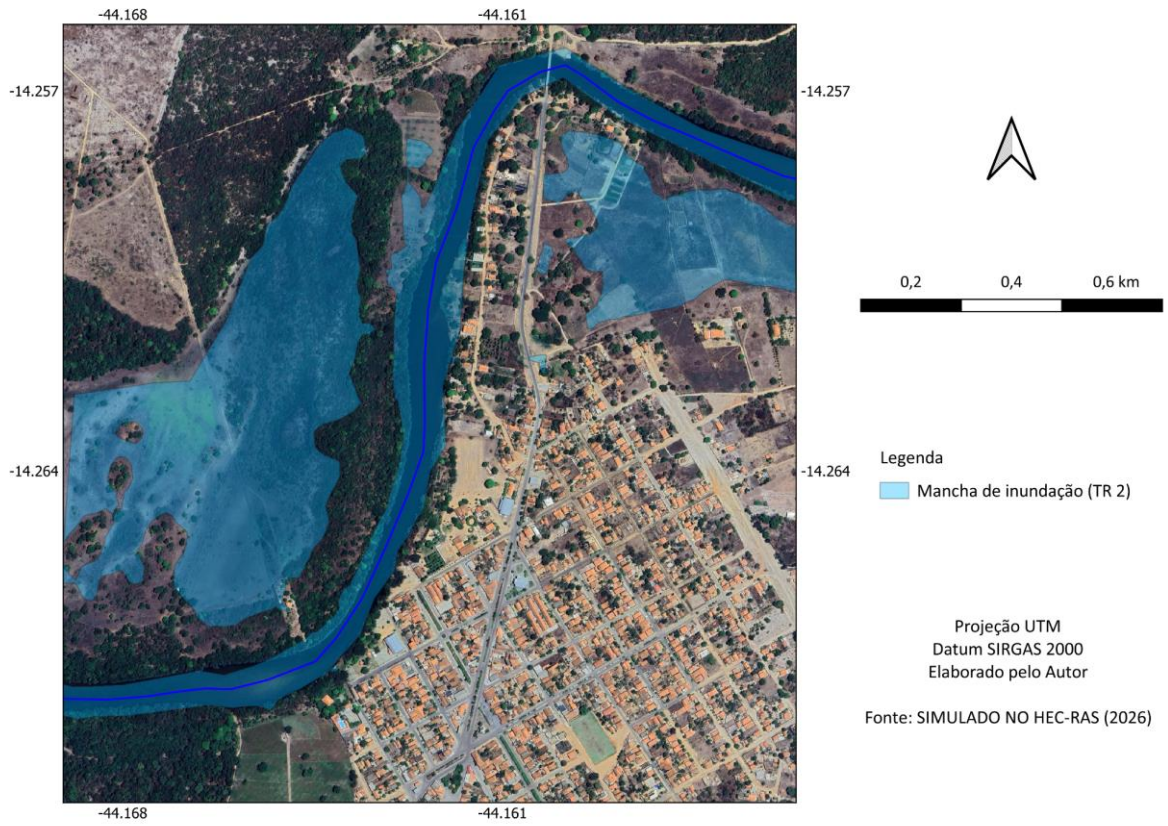
Um resultado importante observado nas Figuras 21 a 25 é a presença de áreas inundadas em grande parte da margem esquerda e na parte mais a jusante da margem direita, com preenchimento de depressões laterais ao canal que assumem feições compatíveis com lagoas marginais. Esse comportamento é coerente com a dinâmica de conectividade hidrológica entre o canal principal e ambientes adjacentes durante períodos de cheia, destacada para o rio Carinhanha e região, em que lagoas marginais desempenham funções ecológicas relevantes e

podem ser temporariamente conectadas ao rio em episódios de inundação (Vasconcelos et al., 2011).

Sob a ótica da Engenharia Urbana, os resultados obtidos e mapas produzidos constituem um insumo direto para a gestão de risco e o planejamento territorial, pois permitem delimitar áreas potencialmente afetadas, orientar restrições de uso do solo e apoiar decisões sobre expansão urbana. Neste trabalho, essa função é tratada de forma explícita ao indicar que produtos de modelagem como mapas de inundação subsidiam a delimitação de áreas que não devem ser ocupadas, apoiam rotas de evacuação, implantação de alerta e direcionamento de investimentos públicos. Além disso, reforça que o mapeamento de áreas suscetíveis e instrumentos de zoneamento são fundamentais para decisões urbanísticas mais seguras, embora sua efetividade dependa de dados técnicos e articulação institucional, o que é um desafio recorrente em municípios de pequeno porte e com baixa capacidade técnica (Cea et al., 2022; Rasch, 2016).

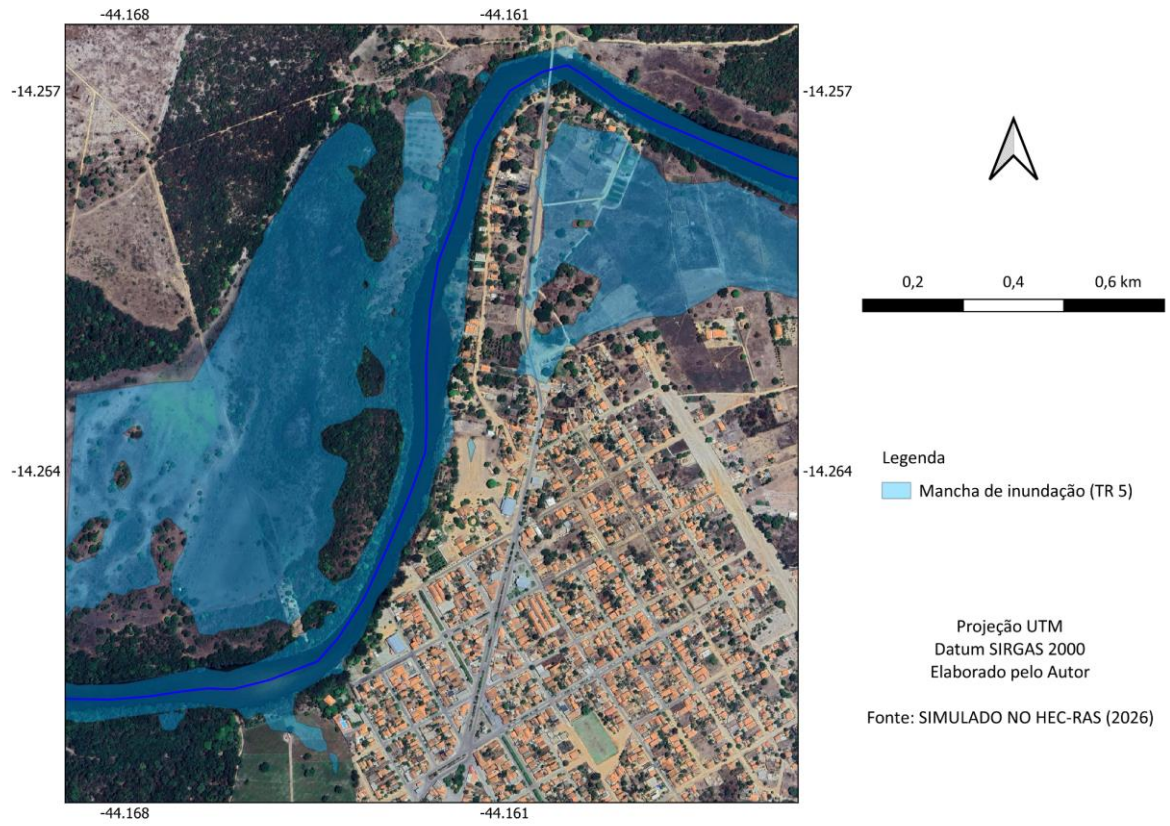
Nesse contexto, considerando que Juvenília apresenta núcleo urbano relativamente pequeno e processo de expansão ainda em consolidação, os resultados sugerem que a principal contribuição prática do estudo está menos em “corrigir” uma ocupação já consolidada e mais em evitar a ocupação futura das áreas naturalmente inundáveis identificadas nas manchas, especialmente aquelas que se expandem nos cenários de maior tempo de retorno e que incluem feições típicas de armazenamento lateral (como as lagoas marginais). Essa abordagem preventiva é coerente com a lógica contemporânea de gestão integrada do risco, que busca reduzir vulnerabilidades por meio de ordenamento territorial e planejamento, e não apenas por respostas estruturais após a ocorrência do evento (Amaral et al., 2020; Cea et al., 2022).

Figura 21 - Mancha de inundação simulada para TR2



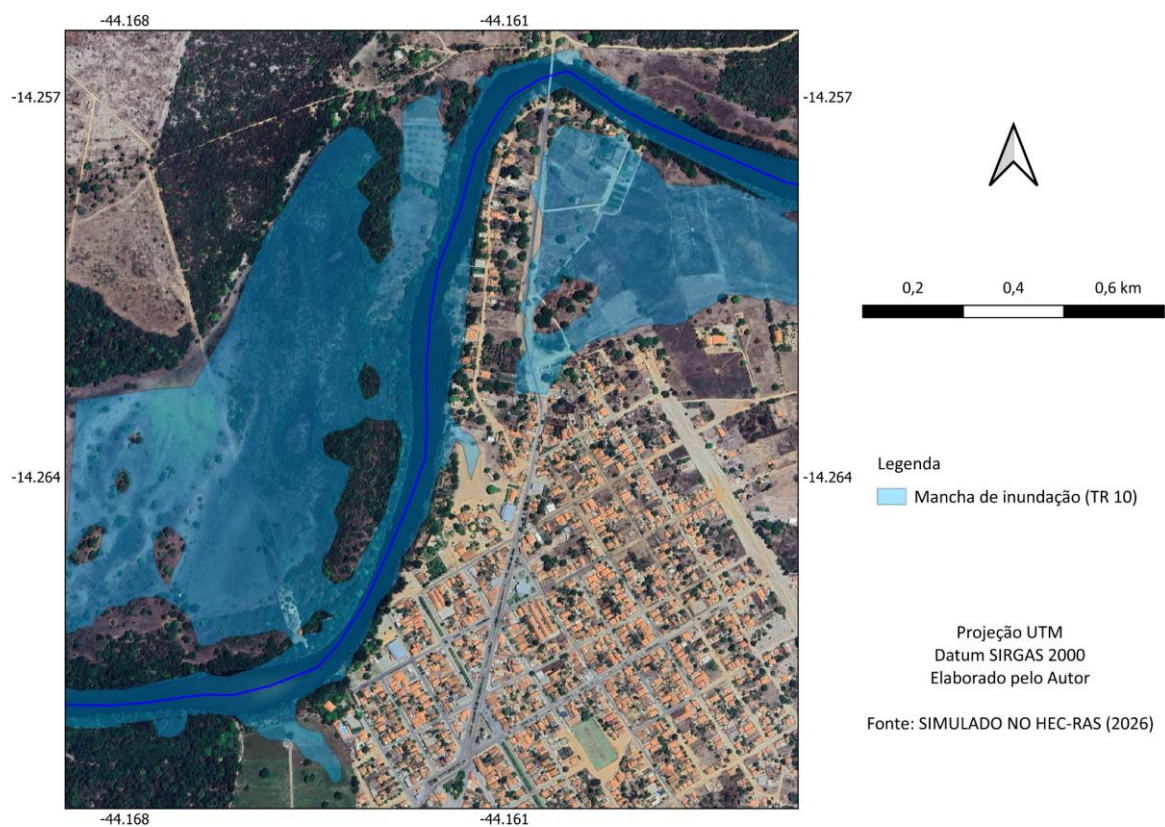
Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Figura 22 - Mancha de inundação simulada para TR5



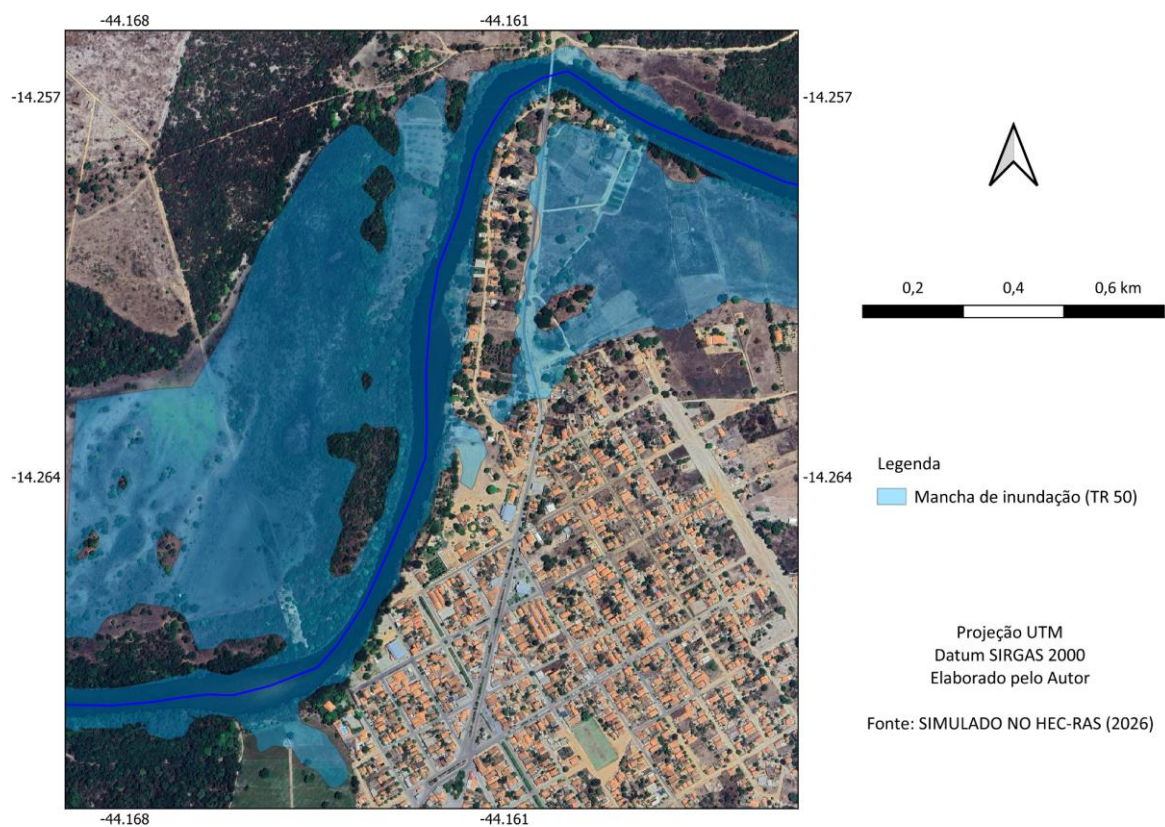
Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Figura 23 - Mancha de inundação simulada para TR10



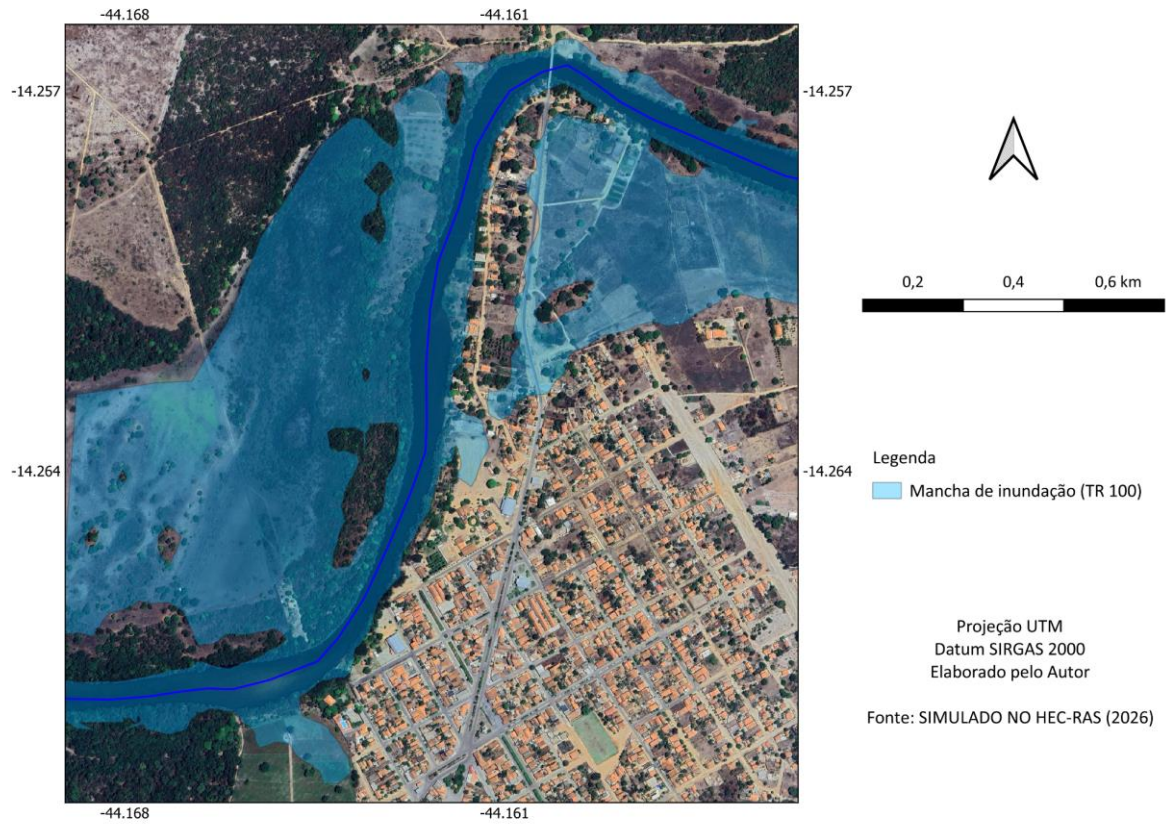
Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Figura 24 - Mancha de inundação simulada para TR50



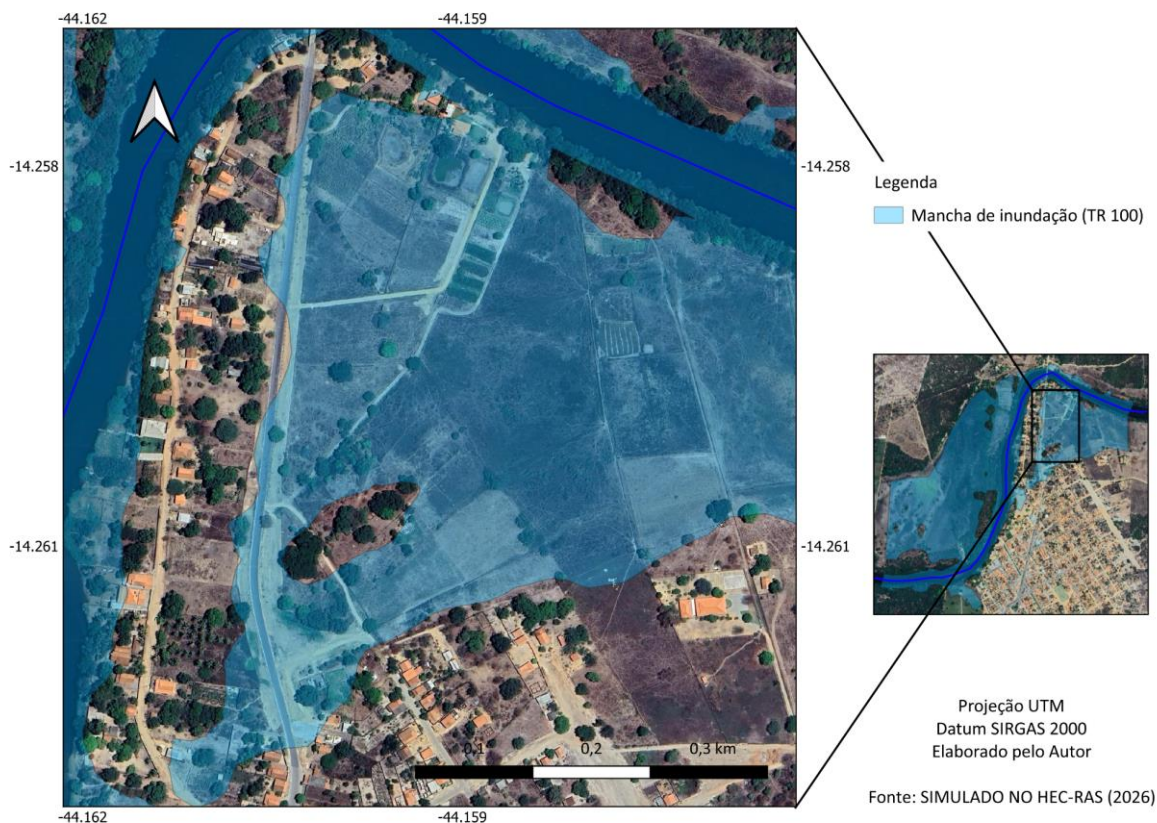
Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Figura 25 - Mancha de inundação simulada para TR100



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Figura 26 - Detalhamento da mancha de inundação no cenário TR100



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

4.5. Resultados da Validação do Modelo

A Tabela 7 apresenta a comparação entre a cota do nível d'água simulada pelo modelo hidrológico e a cota registrada pela estação na mesma e com uma mesma vazão. Para a vazão de $59,851 \text{ m}^3/\text{s}$, o modelo estimou uma cota de 3,16 m, enquanto o valor real observado pela estação fluviométrica foi de 2,87 m, resultando em uma diferença de 29 cm entre os níveis d'água.

Essa diferença pode ser considerada compatível com as incertezas inerentes à modelagem hidrológica em rios naturais, especialmente quando se considera que a seção transversal utilizada no modelo, embora derivada de dados reais da estação fluviométrica, foi corrigida e adaptada para representar todo o trecho modelado. Apesar de a geometria simulada manter a forma geral da seção real, existem diferenças dimensionais relevantes, como a largura da seção, que na condição observada é da ordem de 113 m, enquanto a seção representada no modelo apresenta aproximadamente 89 m. Para uma mesma vazão, uma seção mais estreita tende a resultar em maior elevação da lâmina d'água, uma vez que a redução da área molhada

exige maior profundidade para escoar o mesmo volume de água, fornecendo uma explicação hidráulica consistente para o fato de a cota simulada ter sido superior à cota observada. Esse tipo de comportamento é amplamente reconhecido na literatura de modelagem hidrológica, a qual indica que diferenças geométricas entre seções reais e representadas no modelo podem resultar em variações da ordem de 0,20 a 0,50 m nos níveis d'água simulados, especialmente em canais naturais (USACE, 2002; USACE, 2021).

Além disso, devem ser consideradas outras fontes de incerteza associadas à validação quantitativa, como a variabilidade temporal da geometria do canal, alterações locais do leito e das margens, simplificações na representação da rugosidade hidráulica e limitações inerentes ao uso de uma única seção transversal real para a extrapolação da geometria ao longo de todo o trecho. Ainda assim, a proximidade entre os valores simulados e observados, com diferença inferior a 0,30 m, indica que o modelo apresenta bom desempenho na representação do nível d'água, sobretudo considerando a escala do estudo e a disponibilidade de dados. Resultados semelhantes são reportados na literatura, em que diferenças entre níveis d'água simulados e observados variam tipicamente entre 0,20 m e 0,50 m em rios naturais modelados com dados geométricos limitados (USACE, 2002; USACE, 2021), enquanto estudos nacionais aplicados a contextos urbanos relatam diferenças da ordem de 0,25 m a 0,45 m e consideram esses valores adequados para análises de inundação (Fonseca, 2021; Campos, 2022). Em modelos mais robustos, baseados em dados topográficos de alta resolução, erros médios tendem a ser menores, geralmente entre 0,10 m e 0,25 m, o que evidencia que a diferença obtida neste estudo é coerente com o nível de detalhamento dos dados disponíveis e com os objetivos de planejamento urbano e mapeamento de áreas inundáveis.

Tabela 7 - Comparação entre cota simulada e cota real observada para o evento de 12/08/2019

| Simulação | | Real | | | Diferença (m) |
|---------------------------|-------------------|---------------------------|--------------------|------------|---------------|
| Vazão (m ³ /s) | Cota simulada (m) | Vazão (m ³ /s) | Cota observada (m) | Data | 0,29 |
| 59,851 | 3,16 | 59,851 | 2,87 | 12/08/2019 | |

Fonte: Adaptado de ANA (2020); Simulação do HEC-RAS (2026)

A validação qualitativa foi realizada por meio da análise de imagens históricas do Google Earth Pro, com o objetivo de verificar a coerência espacial das manchas de inundação simuladas pelo modelo hidrológico. Ressalta-se que, devido à escassez de imagens históricas adequadas para a região de estudo, especialmente associadas a períodos de cheia com boa resolução espacial, a análise concentrou-se em uma imagem datada de maio de 2004, a única que permitiu identificar de forma mais clara evidências de extravasamento do canal e de ocupação da planície adjacente. A Figura 27 apresenta essa imagem, na qual é possível observar áreas alagadas próximas ao canal principal e feições compatíveis com a formação de lagoas marginais. A comparação visual entre essas áreas observadas e as manchas simuladas indica coerência quanto à ocupação preferencial das áreas mais rebaixadas da planície de inundação, particularmente na margem esquerda, ainda que a análise esteja condicionada às limitações impostas pela disponibilidade temporal e pela qualidade das imagens.

De forma geral, os resultados da validação indicam que o modelo hidrológico é capaz de representar adequadamente os padrões de inundação e os níveis d'água, considerando as limitações associadas à disponibilidade de dados geométricos, hidrológicos e espaciais. A validação reforça a confiabilidade dos resultados apresentados nos tópicos anteriores, ao mesmo tempo em que evidencia a necessidade de interpretações cautelosas, sobretudo em estudos aplicados a rios naturais, nos quais a variabilidade geométrica do canal e a escassez de registros históricos detalhados constituem fatores recorrentes.

Figura 27 - Imagem histórica evidenciando áreas inundadas no trecho de estudo do rio Carinhanha.



Fonte: Google Earth Pro (2004)

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a dinâmica fluvial da sub-bacia do rio Carinhanha, com ênfase na identificação e delimitação de manchas de inundação em áreas urbanas, por meio da integração entre modelagem hidrológica e técnicas de geoprocessamento. A aplicação do software HEC-RAS, associada ao tratamento de dados espaciais em ambiente de Sistema de Informação Geográfica, possibilitou a representação do comportamento do escoamento fluvial em cenários de cheia e a espacialização das áreas potencialmente suscetíveis à inundação no trecho urbano analisado.

Os resultados obtidos evidenciam que as manchas de inundação apresentam forte relação com a configuração geométrica do canal, o relevo adjacente e os padrões de uso e ocupação do solo próximos à calha fluvial. Observou-se que uma parcela reduzida das áreas atualmente dotadas de infraestrutura urbana é diretamente afetada pelos cenários de inundação simulados, enquanto extensas áreas ainda não ocupadas ou com baixa densidade de urbanização apresentam alta vulnerabilidade e suscetibilidade à inundação. Esse resultado reforça o potencial do estudo como instrumento de gestão de riscos em áreas já urbanizadas, e como subsídio técnico ao planejamento urbano voltado à expansão futura da malha urbana. Nesse sentido, o mapeamento das manchas de inundação permite identificar zonas que devem ser evitadas em processos de crescimento urbano, contribuindo para a prevenção da ocupação de áreas naturalmente inundáveis e para a promoção de um ordenamento territorial mais seguro e sustentável, conforme apontado por abordagens contemporâneas de planejamento urbano e gestão de riscos hidrológicos (Amaral et al., 2020; Cea et al., 2022).

Do ponto de vista da Engenharia Urbana, a delimitação das áreas inundáveis demonstrou-se uma ferramenta essencial para subsidiar decisões relacionadas ao uso e ocupação do solo, à definição de diretrizes urbanísticas e à atuação dos órgãos de defesa civil. A espacialização das manchas de inundação fornece informações técnicas relevantes para a formulação de políticas públicas voltadas à redução da vulnerabilidade urbana e à mitigação dos impactos associados a eventos hidrológicos extremos, especialmente em municípios de pequeno porte, onde a antecipação dos riscos pode representar um diferencial estratégico para o desenvolvimento urbano (ANA, 2024).

A integração entre dados fluviométricos históricos, geoprocessamento e modelagem hidrológica mostrou-se adequada para a análise de inundações em contextos de restrição de dados, evidenciando o potencial dessas ferramentas como suporte à gestão urbana e ambiental. A utilização de bases oficiais de dados hidrológicos, aliada à aplicação de modelos consolidados

na literatura, permitiu a construção de cenários hidraulicamente consistentes, em consonância com metodologias amplamente empregadas em estudos nacionais e internacionais voltados ao mapeamento de áreas inundáveis (Tucci, 2013; Zhou et al., 2021).

Entretanto, algumas limitações devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A principal restrição do estudo está associada à falta de disponibilidade de dados batimétricos ao longo do trecho modelado, uma vez que a representação da geometria submersa do canal baseou-se em informações de uma única seção, o que limita a descrição detalhada das variações do leito em toda a extensão analisada. Essa condição reflete uma realidade comum em estudos aplicados a bacias com escassez de dados batimétricos contínuos, devendo ser consideradas na aplicação dos resultados para fins de planejamento e gestão.

Como recomendações para o aprimoramento e a evolução deste tipo de estudo, destaca-se a importância da incorporação de levantamentos batimétricos mais detalhados ao longo de todo o trecho analisado, bem como da aplicação de modelos bidimensionais, capazes de representar com maior fidelidade a propagação lateral das cheias em áreas urbanas. Sugere-se, ainda, a integração dos mapas de inundação com indicadores socioeconômicos e de vulnerabilidade social, ampliando a análise para além do componente físico e fortalecendo o suporte à tomada de decisão no planejamento urbano. A atualização periódica das análises, considerando cenários de expansão urbana e de mudanças climáticas, também se mostra fundamental para a construção de cidades mais resilientes e adaptadas aos desafios hidrológicos futuros.

Por fim, conclui-se que o estudo atingiu seus objetivos ao demonstrar a aplicabilidade da modelagem hidrológica associada ao geoprocessamento na identificação de áreas suscetíveis à inundação em contexto urbano. Os resultados obtidos contribuem para o avanço do conhecimento aplicado à Engenharia Urbana e reforçam a relevância de abordagens preventivas e integradas na gestão de riscos hidrológicos, oferecendo subsídios técnicos que podem apoiar o planejamento territorial e orientar o crescimento urbano de forma mais segura e sustentável na sub-bacia do rio Carinhanha.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2021. Brasília: ANA, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Revitalização da bacia hidrográfica do Rio São Francisco: Relatório consolidado. Brasília: ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2024.

AGÊNCIA PEIXE VIVO; COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO (CBHSF). Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: 2016–2025. Belo Horizonte: CBHSF, 2020.

AMARAL, R.; ROSS, J. L. S. A legislação e a gestão para redução de riscos relacionados a inundações no município de São Paulo/SP. *Sociedade & Natureza*, v. 32, p. 501-514, 2020.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Catálogo de Metadados do SNIRH. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>. Acesso em: 29 jul. 2025.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – HidroWeb. Brasília, 2020.

BORGES, K. M. R.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F. Vulnerabilidade natural: a perda de solo da bacia do rio Carinhonha (MG/BA) usando uma abordagem qualitativa da Equação Universal de Perda de Solos. *Geographia*, Niterói, v. 14, n. 27, p. 100–116, 2013.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Manual técnico: planejamento urbano e gestão de riscos de desastres naturais em áreas urbanas. Brasília: MI, 2016.

CABRAL, S. L.; CAMPOS, J. N. B.; DA SILVA SILVEIRA, C.; DE ASSIS TEIXEIRA, F. A. Integração do SIG, HEC-HMS e HEC-RAS no mapeamento de área de inundação urbana: aplicação à bacia do Rio Granjeiro-CE. *Geociências (UNESP)*, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 90–101, 2016.

CALEGARIO, A. T.; ASSIS, C. M. de A.; BRUMANO, C. L.; DAMASCENO, C. R. A.; ARAGAO, J.; AMORIM, R. S. S.; MOREIRA, M. C.; SILVA, D. D. da; VAZ JUNIOR, G.; LOURENCO, A. M. G. Download e pre-processamento de dados hidroclimáticos do Hidroweb/ANA com o pacote Hydrobr. 2024.

CAMPOS, A. F. S. Simulação no software HEC-RAS da mancha de inundação do rio Itabirito na cidade de Itabirito – MG para diferentes períodos de retorno. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

CÂNDIDO, M. de O. SEAF – Sistema Especialista de Análise de Frequência, 2003.

CARINHANHA. Plano Municipal de Saneamento Básico de Carinhanha. Carinhanha: Prefeitura Municipal de Carinhanha, 2017. CBHSF – COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. Caracterização da Bacia do Rio São Francisco. 2024.

CEA, L.; COSTABILE, P. Flood risk in urban areas: Modelling, management and adaptation to climate change. A review. *Hydrology*, v. 9, n. 3, p. 50, 2022.

CHAUDHRY, M. H. *Open-channel flow*. 2. ed. New York: Springer, 2008.

CHOW, V.T. *Open Channel Hydraulics*. [S.l.]: [s.n.], 1959.

COLLISCHONN, W.; JARDIM, P. F.; FONTANA, R. B. Redução da vazão no rio Carinhanha nos últimos anos pode ser explicada pela redução da chuva. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 24., 2021. Anais [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2021.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO – CBH-SF. Seca e assoreamento inviabilizam navegação no Rio São Francisco. Salvador, 17 set. 2024.

CORREIO24HORAS. Carinhanha, na Bahia, segue sofrendo com inundações após chuva do fim de 2021. *Correio24horas*, Salvador, 16 jan. 2022. Disponível em: <https://www.correio24horas.com.br/brasil/carinhanha-na-bahia-segue-sofrendo-com-inundacoes-apos-chuva-do-fim-de-2021-0122>. Acesso em: 24 jun. 2025.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Acompanhamento da estiagem na região Sudeste do Brasil. *Boletim nº 06 – Outubro 2018*. [S. l.], out. 2018.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Monitoramento hidrológico da bacia hidrográfica do rio São Francisco: relatório técnico consolidado. Brasília: CPRM, 2018.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Classificação de Solos: Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS)*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2023.

ESCOBAR-SILVA, E. V.; ALMEIDA, C. M. D.; SILVA, G. B. L. D.; BURSTEINAS, I.; ROCHA FILHO, K. L. D.; DE OLIVEIRA, C. G.; FAGUNDES, M. R.; PAIVA, R. C. D. Assessing the extent of flood-prone areas in a South-American megacity using different high resolution DTMs. *Water*, Basel, v. 15, n. 6, p. 1127, 2023.

FELIX, V. S.; PAZ, A. R. Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. *RBRH*, v. 21, p. 556-569, 2016.

FONSECA, A. L. Análise hidrometeorológica e modelagem hidráulica e hidrológica para simulação da mancha de inundação: estudo de caso na bacia do rio Quitandinha-Petrópolis-RJ. 2021.

GILVEAR, D.; BRYANT, R. Analysis of remotely sensed data for fluvial geomorphology and river science. *Tools in fluvial geomorphology*, p. 103-132, 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Portal de Mapas. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>. Acesso em: 29 jul. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Juvenília. In: Cidades e Estados. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/juvenilia.html>. Acesso em: 2026.

IOSUB, M.; MINEA, I.; HAPCIUC, O.; ROMANESCU, G. H. THE USE OF HEC-RAS MODELLING IN FLOOD RISK ANALYSIS. Air & Water Components of the Environment/Aerul Si Apa Componente Ale Mediului, 2015.

KNIGHTON, D. Fluvial forms and processes: a new perspective. Routledge, 2014.

LOPES, J. W. B.. Modelagem hidrossedimentológica em meso-bacia do semiárido. 2013.

MALTA, F. S.; COSTA, E. M.; MAGRINI, A. Índice de vulnerabilidade socioambiental: uma proposta metodológica utilizando o caso do Rio de Janeiro, Brasil. Ciência & Saúde Coletiva, v. 22, p. 3933-3944, 2017.

MAPBIOMAS – Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil. Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso do Solo do Brasil. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

MARTINS, W. R.; SILVA, A. A.; CASTRO, J. D. B. DESAFIOS AMBIENTAIS NA BACIA DO RIO PASSA-TRÊS: Impactos das mudanças no uso da terra nos recursos hídricos. REVISTA EQUADOR, v. 12, n. 2, p. 119-140, 2023.

MENDES, T. A.; SOUSA, M. B. D.; PEREIRA, S. A. D. S.; SANTOS, K. A. D.; FORMIGA, K. T. M. Uso do modelo HEC-RAS com base em informações de LiDAR para avaliação de inundações urbanas. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 27, n. 1, p. 141–157, 2022.

MUSTAFA, A.; SZYDŁOWSKI, M.; VEYSIPANAH, M.; HAMEED, H. M. GIS-based hydrodynamic modeling for urban flood mitigation in fast-growing regions: a case study of Erbil, Kurdistan Region of Iraq. Scientific Reports, London, v. 13, p. 8935, 2023.

OpenTopography – High-Resolution Topography Data and Tools. Disponível em: <https://opentopography.org/>. Acesso em: 30 jul. 2025.

PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. D.; RAMOS, M. M. Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 11, n. 6, p. 615–622, 2007.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CARINHANHA. Plano Municipal de Saneamento Básico: Diagnóstico da Situação do Saneamento Básico de Carinhanha. Carinhanha: DRZ Geotecnologia, 2016.

RASCH, R. J. Assessing urban vulnerability to flood hazard in Brazilian municipalities. Environment and urbanization, v. 28, n. 1, p. 145-168, 2016.

REIS, P. A. dos. Identificação de áreas vulneráveis às enchentes e inundações em áreas urbanas através de modelos topográficos e hidráulicos. 2015. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

ROCHA, L. H. D. S.; SILVA, D. F. D.; KAYANO, M. T.; BONFIM, O. E. T. Homogeneidade, eventos extremos e suas causas climáticas: Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 37, n. 2, p. 199–212, 2022.

SALGUEIRO, J. H. P. D. B.; PINTO, É. J. D. A.; DINIZ, J. A. O.; PAULA, T. L. F. D. Análises gráficas simultâneas das variáveis climáticas na bacia do rio Carinhanha. In: XVII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2021, Aracaju. Anais [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2021.

SANTOS, C. J. da S. Estudo da dinâmica de margens em ambiente fluvial do semiárido: bacia hidrográfica do Rio Taperoá-PB. 2020.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). GeoSGB: sistema de geociências do Serviço Geológico do Brasil. Brasília: SGB, s.d. Disponível em: <https://geosgb.sgb.gov.br/>. Acesso em: 19 jan. 2026.

SGB – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL; ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Estratégias para mitigação de eventos hidrológicos extremos. Brasília: SGB/ANA, 2024.

SILVEIRA, C. W. Análise de sensibilidade de vazões a alterações de precipitação na bacia hidrográfica do rio Carinhanha. Monografia (Graduação). Pelotas, Universidade Federal de Pelotas, 2015.

SIQUEIRA, D. de J. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica para avaliação de risco de inundações na região superior da bacia do rio Jundiá. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2023.

TAFFARELLO, D.; GUIMARÃES, J.; LOMBARDI, R. D. S.; CALIJURI, M. D. C.; MENDIONDO, E. M. Hydrologic monitoring plan of the Brazilian Water Producer/PCJ project. *Journal of Environmental Protection*, v. 7, n. 12, p. 1956-1970, 2016.

TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. 6. ed. Porto Alegre: ABRH, 2013.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS – USACE. HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual. Davis, CA: Hydrologic Engineering Center, 2002.

URBANI, G. L.; GRACIOSA, M. C. P.; BRAMBILA, M. C. V. Delimitação de manchas de inundação na bacia do córrego do Ipiranga, São Paulo–SP, Brasil, com modelagem hidrológico-hidráulica utilizando HEC-HMS/HEC-RAS. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 20, n. 2023, 2023.

USACE – Hydrologic Engineering Center (HEC). HEC-RAS River Analysis System 2D Modeling User’s Manual, Version 6.0. Davis, CA: US Army Corps of Engineers, 2021.

VASCONCELOS, V. V.; CHAVES, R. M. Caracterização Sócio-Ambiental da foz do rio Carinhanha e propostas para sua gestão sustentável. CLIMEP-Climatologia e Estudos da Paisagem, 2011, 6.1-2.

VERÇOSA, L. F. de M. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica aplicada à avaliação da ocorrência de inundações na cidade de Recife, PE. 2019.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Guide to Hydrological Practices: Volume I – Hydrology: From Measurement to Hydrological Information. 6th ed. Geneva: WMO-No. 168, 2008.

ZHOU, Q.; SU, J.; ARNBJERG-NIELSEN, K.; REN, Y.; LUO, J.; YE, Z.; FENG, J. A GIS-based hydrological modeling approach for rapid urban flood hazard assessment. Water, Basel, v. 13, n. 11, p. 1483, 2021.