



INSTITUTO FEDERAL
Piauí



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM ANÁLISE E PLANEJAMENTO ESPACIAL

FRANCISCO RODRIGUES DA SILVA FILHO

ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES NA CIDADE DE UNIÃO-PI: uma
análise espacial de fatores de risco por meio de Análise
Multicritério e Geoprocessamento

TERESINA - PIAUÍ

2026

FRANCISCO RODRIGUES DA SILVA FILHO

**ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES NA CIDADE DE UNIÃO–PI: uma
análise espacial de fatores de risco por meio de Análise
Multicritério e Geoprocessamento**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Planejamento Espacial do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Análise e Planejamento Espacial
Área de concentração: Planejamento Territorial e Geoprocessamento.

Orientador: Prof. Dr. Reurysson Chagas de Sousa
Morais

TERESINA – PIAUÍ

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Silva Filho, Francisco Rodrigues da

S586a Alagamentos e inundações na cidade de União - PI : uma análise espacial de fatores de risco por meio de Análise Multicritério e Geoprocessamento / Francisco Rodrigues da Silva Filho. - 2026.

168 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado Profissional em Análise e Planejamento Espacial) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, 2026.

Orientador : Prof Dr. Reurysson Chagas de Sousa Moraes.

1. Alagamentos e inundações urbanas. 2. Fatores de risco. 3. Processo de Análise Hierárquica (AHP). 4. Geoprocessamento. I. Título.

CDD - 910

FRANCISCO RODRIGUES DA SILVA FILHO

**ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES NA CIDADE DE UNIÃO-PI: uma
análise espacial de fatores de risco por meio de Análise
Multicritério e Geoprocessamento**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Análise e
Planejamento Espacial do Instituto Federal do
Piauí, como parte integrante dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em Análise e
Planejamento Espacial.

Aprovada em: 19/08/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Reurysson Chagas de Sousa Morais (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Mauro César de Brito Sousa
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Profa. Dra. Elayne da Silva Figueredo
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Dedico este trabalho à cidade de União, Piauí, que inspirou esta pesquisa e fortaleceu o propósito de contribuir, por meio da ciência, para a compreensão e a redução dos riscos hidrológicos, em busca de um futuro mais seguro para sua população.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder força, sabedoria e coragem para enfrentar cada desafio ao longo desta caminhada. Nos momentos de dificuldade, foi a fé que me sustentou e me deu forças para seguir em frente.

À minha esposa, Maria Victória, deixo minha mais sincera gratidão pelo amor, pela paciência e pelo apoio em todos os momentos. Obrigado por compreender as horas de dedicação, pela palavra de incentivo quando o desânimo aparecia e por acreditar em mim até mesmo quando eu duvidava da minha própria capacidade.

Aos meus pais, Maria e Francisco, e aos meus irmãos, pelos valores e princípios que moldaram minha trajetória.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Reurysson Chagas de Sousa Moraes, meu sincero agradecimento pela confiança, pelas orientações, pela disponibilidade e pelas contribuições fundamentais durante o desenvolvimento desta pesquisa. Sua experiência e seus ensinamentos foram essenciais para a construção deste trabalho.

À Prefeitura Municipal de União, agradeço pela disponibilidade e pela colaboração no fornecimento dos dados da base cartográfica do município, que foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para esta etapa da minha vida. Cada palavra de incentivo, cada gesto de apoio e cada contribuição, por menor que parecesse, fizeram diferença nesta caminhada.

Este trabalho contou com apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí – FAPEPI, por meio de bolsa de mestrado concedida no âmbito do Programa de Apoio à Pós-Graduação Stricto Sensu (PAPG), Edital nº 003/2024.

“A preocupação com o ser humano e com seu destino deve ser
sempre o principal objetivo de todo esforço técnico.”

Albert Einstein

RESUMO

No Brasil, o risco de alagamentos e inundações urbanas é um problema presente em boa parte das cidades, principalmente onde a ocupação do solo cresceu sem planejamento, deixando pouca área permeável, e onde chuvas fortes ultrapassaram o que a drenagem instalada consegue escoar. Em União, no Piauí, esse tipo de evento já causou prejuízo econômico, social e à saúde da população, a título de exemplo, tem-se a enchente ocorrida na cidade em 2009, que deixou mais de 100 famílias desabrigadas (Cidade Verde, 2009). Foi esse cenário que motivou a pesquisa, cujo objetivo central foi analisar espacialmente os fatores de risco de alagamento e inundação na zona urbana consolidada do município a partir de três frentes: a suscetibilidade física do território, a exposição da população e das estruturas urbanas, e a vulnerabilidade socioeconômica de quem ocupa essas áreas. Para isso, um Sistema de Informações Geográficas (SIG) reuniu e integrou dados espaciais, urbanos e socioeconômicos provenientes de órgãos governamentais, formando a base de uma análise multicritério conduzida pelo método do Processo de Análise Hierárquica (AHP). Na componente Suscetibilidade foram tratados os atributos físicos do terreno, caso da declividade, da altimetria, da distância até a drenagem urbana e ao Rio Parnaíba e do uso e cobertura do solo, todos ligados à propensão do solo ao acúmulo de água. Na Exposição pesaram a presença de população, de edificações e de equipamentos urbanos sensíveis, expressando os elementos que podem ser afetados caso ocorram alagamentos ou inundações. A Vulnerabilidade, por fim, trouxe variáveis socioeconômicas como renda, faixa etária, escolaridade e densidade domiciliar, ligadas às diferentes condições da população para enfrentar, responder e recuperar-se dos impactos provocados por eventos hidrológicos. Depois de ponderados por julgamento par a par, os três componentes se uniram em uma única carta de fatores de risco, que separa o território urbano consolidado de União por nível de risco. Os resultados mostraram que as áreas classificadas como de risco alto e muito alto coincidiram com os locais onde foram registrados eventos hidrológicos reais entre 2008 e 2021. Essa correspondência indica que a abordagem AHP, aplicada aos componentes Suscetibilidade, Exposição e Vulnerabilidade, foi capaz de representar adequadamente as áreas mais críticas da zona urbana consolidada de União-PI. Como produto final, a carta de fatores de risco serve de referência para o poder

público planejar medidas de mitigação e reduzir os efeitos desses eventos sobre a população, a economia e o meio ambiente.

Palavras-chave: alagamentos e inundações urbanas; fatores de risco; processo de análise hierárquica (AHP); geoprocessamento.

ABSTRACT

In Brazil, the risk of urban pluvial flooding and river flooding is a widespread problem in many cities, particularly where land occupation has expanded without planning, reducing permeable surface area, and where heavy rainfall has exceeded the capacity of the existing drainage system. In União, in the state of Piauí, this type of event has already caused economic and social damage as well as harm to public health; as an example, the flood that occurred in the city in 2009 left more than 100 families homeless (Cidade Verde, 2009). It was this scenario that motivated the research, whose main objective was to spatially analyze the risk factors for urban pluvial and river flooding in the consolidated urban area of the municipality from three fronts: the physical susceptibility of the territory, the exposure of the population and urban structures, and the socioeconomic vulnerability of those who occupy these areas. To this end, a Geographic Information System (GIS) gathered and integrated spatial, urban, and socioeconomic data from government agencies, forming the basis of a multicriteria analysis conducted using the analytic hierarchy process (AHP) method. In the Susceptibility component, the physical attributes of the terrain were addressed, such as slope, elevation, distance to urban drainage and to the Parnaíba River, and land use and cover, all related to the soil's propensity for water accumulation. In the Exposure component, the presence of population, buildings, and sensitive urban facilities were weighted, expressing the elements that could be affected in the event of flooding. Vulnerability, in turn, incorporated socioeconomic variables such as income, age group, education, and household density, linked to the population's differing conditions to face, respond to, and recover from the impacts caused by hydrological events. After being weighted through pairwise judgment, the three components were combined into a single risk factors map, which classifies the consolidated urban area of União by risk level. The results showed that the areas classified as high and very high risk coincided with the locations where real hydrological events were recorded between 2008 and 2021. This correspondence indicates that the AHP approach, applied to the Susceptibility, Exposure, and Vulnerability components, was able to adequately represent the most critical areas of the consolidated urban zone of União-PI. As a final product, the risk factors map serves as a reference for public authorities to plan mitigation measures and reduce the effects of these events on the population, the economy, and the environment.

Keywords: urban pluvial and river flooding; risk factors; analytic hierarchy process (AHP); geoprocessing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diferenças entre as terminologias	33
Figura 2 – Mapa do Zoneamento Urbano de União	38
Figura 3 – Localização do Município de União-PI	76
Figura 4 – Localização da área de estudo	77
Figura 5 – Vetorização da Zona Urbana.....	78
Figura 6 – Distribuição da população urbana por setores censitários	79
Figura 7 – Modelo Digital de Elevação do Município de União	83
Figura 8 – Modelo Digital de Terreno	84
Figura 9 – Mapa de Uso e Cobertura do Solo no Município de União	85
Figura 10 – Climograma do Município de União	86
Figura 11 – Localização das Bacias Hidrográficas	88
Figura 12 – Trechos de drenagem da Zona Urbana.....	89
Figura 13 – Barragem Filinto Rêgo	90
Figura 14 – Passagem sobre o Córrego dos Barreiros	91
Figura 15 – Transbordamento do Riacho do Caranguejo (Zona Urbana de União) ..	91
Figura 16 – Cheia em 2009	93
Figura 17 – Inundação no Bairro Beira-Rio	94
Figura 18 – Cheia no Rio Parnaíba	95
Figura 19 – Alagamento em Via Urbana.....	96
Figura 20 – Fluxograma síntese do percurso metodológico.....	99
Figura 21 – Carta do Índice de Suscetibilidade	144
Figura 22 – Carta do Índice de Exposição	145
Figura 23 – Carta do Índice de Vulnerabilidade	146
Figura 24 – Carta de Fatores de Risco de alagamentos e inundações urbanas	148
Figura 25 – Carta de Validação da Metodologia.....	149

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Escala Fundamental de Saaty	61
Quadro 2 – Precedentes brasileiros da aplicação do AHP em suscetibilidade e risco de inundação	64
Quadro 3 – Dados brutos utilizados na pesquisa	103
Quadro 4 – Síntese dos critérios do componente Suscetibilidade	111
Quadro 5 – Síntese dos critérios do componente Exposição	117
Quadro 6 – Síntese dos critérios do componente Vulnerabilidade	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índice Aleatório (IR) por ordem de matriz	62
Tabela 2 – Classes de suscetibilidade por Altimetria	106
Tabela 3 – Classes de suscetibilidade por Declividade	107
Tabela 4 – Classes de suscetibilidade por Proximidade à Drenagem Secundária ..	108
Tabela 5 – Classes de suscetibilidade por Uso e Cobertura do Solo	109
Tabela 6 – Classes de suscetibilidade por Densidade Populacional	114
Tabela 7 – Classes de suscetibilidade por Taxa de Ocupação Construída	115
Tabela 8 – Classes de suscetibilidade por Equipamentos Urbanos Sensíveis.....	116
Tabela 9 – Classes de Vulnerabilidade por Renda	119
Tabela 10 – Classes de Vulnerabilidade por Densidade Domiciliar	120
Tabela 11 – Classes de Vulnerabilidade por Escolaridade	121
Tabela 12 – Classes de vulnerabilidade por Percentual de População em Faixas Etárias Dependentes	122
Tabela 13 – Matriz de julgamento par a par do componente Suscetibilidade.....	125
Tabela 14 – Matriz de julgamento par a par do componente Exposição	126
Tabela 15 – Matriz de julgamento par a par do componente Vulnerabilidade	127
Tabela 16 – Matriz de julgamento par a par entre os três índices componentes.....	129
Tabela 17 – Distribuição dos setores por classe de suscetibilidade, Altimetria	132
Tabela 18 – Distribuição dos setores por classe de suscetibilidade, Declividade....	132
Tabela 19 – Distribuição dos setores por classe de suscetibilidade, Proximidade à Drenagem Secundária	133
Tabela 20 – Distribuição dos setores por classe de suscetibilidade, Proximidade ao Rio Parnaíba	134
Tabela 21 – Distribuição dos setores por classe de suscetibilidade, Uso e Cobertura do Solo	135
Tabela 22 – Distribuição dos setores por classe de Densidade Populacional	135
Tabela 23 – Distribuição dos setores por classe de Taxa de Ocupação Construída	136
Tabela 24 – Distribuição dos setores por classe de Equipamentos Urbanos Sensíveis	137
Tabela 25 – Distribuição dos setores por classe de Renda	138
Tabela 26 – Distribuição dos setores por classe de Densidade Domiciliar	138
Tabela 27 – Distribuição dos setores por classe de Escolaridade	139

Tabela 28 – Distribuição dos setores por classe de Percentual de População em Faixas Etárias Dependentes	139
Tabela 29 – Pesos da matriz de comparação pareada do componente Suscetibilidade	141
Tabela 30 – Pesos da matriz de comparação pareada do componente Exposição	141
Tabela 31 – Pesos da matriz de comparação pareada do componente Vulnerabilidade	142
Tabela 32 – Pesos da matriz de comparação pareada entre os três índices componentes	142
Tabela 33 – Distribuição por área das classes do Índice de Suscetibilidade	144
Tabela 34 – Distribuição por área das classes do Índice de Exposição	145
Tabela 35 – Distribuição por área das classes do Índice de Vulnerabilidade	147
Tabela 36 – Distribuição por área das classes da Carta de Fatores de Risco	148

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	Analytic Hierarchy Process (Processo de Análise Hierárquica)
AMC	Análise Multicritério
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
BDIA	Banco de Dados e Informações Ambientais
CEPRO	Fundação Centro de Pesquisas Econômicas e Sociais do Piauí
CN	Curve Number (Número de Curva - método hidrológico do SCS)
COPPE/UFRJ	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais / Serviço Geológico do Brasil
CRAS	Centro de Referência de Assistência Social
CREA	Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
DEM	Digital Elevation Model (Modelo Digital de Elevação)
EDUFPI	Editora da Universidade Federal do Piauí
EDUSP	Editora da Universidade de São Paulo
EIV	Estudo de Impacto de Vizinhança
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPSG	European Petroleum Survey Group (Sistema de códigos identificadores de coordenadas espaciais)
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
GIS	Geographic Information System (Sistema de Informação Geográfica)
GNSS	Global Navigation Satellite System (Sistema Global de Navegação por Satélite)

GRASS	Geographic Resources Analysis Support System
GVF	Goodness of Variance Fit (Qualidade de Ajuste de Variância)
HAND	Height Above the Nearest Drainage (Altura Acima da Drenagem Mais Próxima - modelo de relevo)
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de Consistência (na modelagem AHP)
IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
IR	Índice Aleatório / Índice Randômico (na modelagem AHP)
IVI	Índice de Vulnerabilidade a Inundação
LID	Low Impact Development (Desenvolvimento de Baixo Impacto)
MDT	Modelo Digital de Terreno
MGB	Modelo de Grandes Bacias (modelo hidrológico distribuído)
NBR	Norma Brasileira
PEUC	Parcelamento, Edificação ou Utilização Compulsórios
PMSB	Plano Municipal de Saneamento Básico
RBRH	Revista Brasileira de Recursos Hídricos
RC	Razão de Consistência (na modelagem AHP)
RPA	Remotely Piloted Aircraft (Aeronave Remotamente Pilotada / Drone)
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIRGAS 2000	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000
SWMM	Storm Water Management Model (Modelo de Gestão de Águas Pluviais)

UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNDRR	United Nations International Strategy for Disaster Reduction (Estratégia Internacional das Nações Unidas para Redução de Desastres)
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
USDA-SCS	United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator (Universal Transversa de Mercator)
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
ZEIS	Zonas Especiais de Interesse Social
ZEU	Zona de Expansão Urbana
ZOR	Zona de Ocupação Restrita
ZPA	Zona de Preservação Ambiental
ZTUR	Zona de Transição Urbano-Rural
ZUC	Zona Urbana Consolidada
ZUEC	Zona Urbana em Consolidação

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Grau Celsius (unidade de temperatura)
km	Quilômetro (unidade de comprimento)
km ²	Quilômetro quadrado (unidade de área)
m	Metro (unidade de comprimento)
m ³	Metro cúbico (unidade de volume)
mm	Milímetro (unidade de precipitação pluvial / comprimento)
R\$	Real (unidade monetária oficial do Brasil)
$\lambda_{\text{máx}}$	Maior autovalor de uma matriz / Autovalor máximo (verificação de consistência no AHP)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	CONTEXTO E PROBLEMATIZAÇÃO	23
1.2	JUSTIFICATIVA	25
1.3	HIPÓTESE	26
1.4	OBJETIVOS	26
1.4.1	Objetivo Geral	26
1.4.2	Objetivos Específicos	27
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E CONCEITUAL SOBRE OS RISCOS	
	HIDROLÓGICOS EM AMBIENTES URBANOS	28
2.1	TERMINOLOGIAS RELACIONADAS A ALAGAMENTOS, ENCHENTES E INUNDAÇÕES.....	29
2.1.1	Planícies de Inundação	29
2.1.2	Inundações, Enchentes, Cheias e Alagamentos.....	30
2.2	PAISAGEM URBANA	33
2.2.1	Espaço humanizado e transformações antrópicas	34
2.2.2	Urbanização, impermeabilização e escoamento superficial.....	34
2.2.3	Sistemas de drenagem urbana e gestão do espaço	35
2.2.4	Vulnerabilidade urbana e risco ambiental	35
2.2.5	Inter-relação entre urbanização, drenagem e vulnerabilidade	36
2.3	LEGISLAÇÃO APLICÁVEL À GESTÃO DE RISCOS HIDROLÓGICOS URBANOS: ASPECTOS FEDERAL, ESTADUAL E MUNICIPAL	36
2.4	PLANEJAMENTO URBANO E SEU PAPEL NA PREVENÇÃO DE RISCOS HIDROLÓGICOS.....	39
2.5	DRENAGEM URBANA.....	44
2.6	BACIAS HIDROGRÁFICAS: FUNDAMENTOS, DINÂMICAS E GESTÃO INTEGRADA.....	46
2.7	GESTÃO DE RISCOS HIDROLÓGICOS	48
2.7.1	Etapas da Gestão de Riscos.....	49
2.7.2	Gestão Urbana e Ocupação do Solo.....	49
2.7.3	Geotecnologias e Modelagem Hidrológica	50
2.7.4	Escala da Bacia Hidrográfica e Manejo Integrado	50
2.7.5	Mudanças Climáticas e Resiliência	51

2.8	CONCEITOS DE RESILIÊNCIA E VULNERABILIDADE URBANA FRENTE A EVENTOS EXTREMOS	51
2.8.1	Vulnerabilidade Urbana.....	52
2.8.2	Resiliência Urbana	52
2.8.3	Inter-Relação entre Vulnerabilidade e Resiliência	53
2.8.4	Construção Da Resiliência Urbana	53
2.9	FUNDAMENTOS DO GEOPROCESSAMENTO E SUA APLICAÇÃO NO ESTUDO DE RISCOS	54
2.10	ANÁLISE MULTICRITÉRIO COMO FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO INTEGRADA DE FATORES DE RISCO	56
2.11	O PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA (AHP): FUNDAMENTOS, ESCALA DE SAATY, APLICAÇÕES E LIMITES	59
2.11.1	Origem e princípios do método.....	59
2.11.2	Estrutura hierárquica, matriz de comparação paritária e aplicação a critérios espacialmente distribuídos	60
2.11.3	Escala fundamental de Saaty	61
2.11.4	Derivação dos pesos e verificação da consistência	62
2.11.5	Aplicações do AHP em risco de inundação no Brasil, precedentes internacionais e limites do método.....	63
2.12	ÁLGEBRA DE MAPAS E COMBINAÇÃO LINEAR PONDERADA	65
2.12.1	Fundamentos da álgebra de mapas.....	65
2.12.2	Combinação Linear Ponderada como técnica de agregação multicritério em SIG	66
2.13	RISCO COMO FUNÇÃO DE SUSCETIBILIDADE, EXPOSIÇÃO E VULNERABILIDADE	67
2.13.1	A decomposição do risco na literatura de gestão de desastres	67
2.14	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DOS CRITÉRIOS DE SUSCETIBILIDADE, EXPOSIÇÃO E VULNERABILIDADE	69
2.14.1	Fundamentos dos critérios do componente Suscetibilidade.....	69
2.14.2	Fundamentos dos critérios do componente Exposição	71
2.14.3	Fundamentos dos critérios do componente Vulnerabilidade.....	72
3	METODOLOGIA	74
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	74
3.1.1	Aspectos Históricos e Formação Administrativa	74

3.1.2	Localização e Caracterização	76
3.1.3	Aspectos Fisiográficos	81
3.1.3.1	Vegetação, Pedologia, Geologia e Geomorfologia	81
3.1.3.2	Clima	85
3.1.3.3	Bacias Hidrográficas da Zona Urbana	87
3.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	96
3.3	MATERIAIS E FONTES DE DADOS	100
3.4	COMPONENTE SUSCETIBILIDADE	103
3.4.1	Altimetria	105
3.4.2	Declividade.....	106
3.4.3	Proximidade à Drenagem Secundária	107
3.4.4	Proximidade ao Rio Parnaíba	108
3.4.5	Uso e Cobertura do Solo.....	108
3.5	COMPONENTE EXPOSIÇÃO	111
3.5.1	Densidade Populacional	113
3.5.2	Taxa de Ocupação Construída	114
3.5.3	Equipamentos Urbanos Sensíveis	115
3.6	COMPONENTE VULNERABILIDADE.....	117
3.6.1	Renda	118
3.6.2	Densidade Domiciliar	119
3.6.3	Escolaridade	120
3.6.4	Percentual de População em Faixas Etárias Dependentes	121
3.7	APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP	123
3.7.1	Ponderação e Índice de Suscetibilidade	124
3.7.2	Ponderação e Índice de Exposição.....	126
3.7.3	Ponderação e Índice de Vulnerabilidade	127
3.8	INTEGRAÇÃO DOS COMPONENTES E CARTA DE FATORES DE RISCO	128
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	131
4.1	COMPONENTE SUSCETIBILIDADE	131
4.1.1	Altimetria	131
4.1.2	Declividade.....	132
4.1.3	Proximidade à Drenagem Secundária	132
4.1.4	Proximidade ao Rio Parnaíba	133

4.1.5	Uso e Cobertura do Solo.....	134
4.2	COMPONENTE EXPOSIÇÃO.....	135
4.2.1	Densidade Populacional	135
4.2.2	Taxa de Ocupação Construída	135
4.2.3	Equipamentos Urbanos Sensíveis	136
4.3	COMPONENTE VULNERABILIDADE.....	137
4.3.1	Renda	137
4.3.2	Densidade Domiciliar	138
4.3.3	Escolaridade	138
4.3.4	Percentual de População em Faixas Etárias Dependentes	139
4.4	PONDERAÇÃO POR PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA	140
4.4.1	Matriz da Suscetibilidade.....	140
4.4.2	Matriz da Exposição	141
4.4.3	Matriz da Vulnerabilidade	141
4.4.4	Matriz de Integração dos Índices	142
4.5	ÍNDICES INTEGRADOS E CARTA DE FATORES DE RISCO	142
4.5.1	Índice de Suscetibilidade.....	143
4.5.2	Índice de Exposição	144
4.5.3	Índice de Vulnerabilidade	145
4.5.4	Carta de Fatores de Risco	147
4.6	CONFRONTO COM O HISTÓRICO DE ALAGAMENTOS.....	149
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	151
	REFERÊNCIAS	153
	APÊNDICE A – CARTA DE SUSCETIBILIDADE A ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES URBANAS.....	165
	APÊNDICE B – CARTA DE EXPOSIÇÃO A ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES URBANAS.....	166
	APÊNDICE C – CARTA DE VULNERABILIDADE A ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES URBANAS.....	167
	APÊNDICE D – CARTA DE FATORES DE RISCO A ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES URBANAS.....	168

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E PROBLEMATIZAÇÃO

Um dos problemas enfrentados na gestão de diversas cidades brasileiras são os alagamentos e as inundações urbanas. Compreender e analisar esses eventos é fundamental para prevenir sua ocorrência e mitigar seus impactos. Entretanto, trata-se de um desafio, pois envolve uma multiplicidade de fatores interligados, de natureza tanto natural quanto antrópica, o que inclui aspectos como a topografia, a proximidade de cursos d'água, as condições de drenagem urbana e o uso e ocupação do solo.

Esses desafios têm se intensificado no atual cenário de incertezas climáticas. O aumento na frequência e na intensidade de eventos extremos, como a seca severa registrada na Amazônia em 2023 e a grande inundação que atingiu o estado do Rio Grande do Sul em maio de 2024, evidencia a urgência em se identificar as populações em situação de vulnerabilidade e mapear, com precisão, as áreas de risco hidrológico. Esse mapeamento não apenas subsidia ações emergenciais, mas também orienta o planejamento urbano e as políticas públicas de prevenção.

De acordo com a Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC (2013), as enxurradas e as inundações representam, respectivamente, 21% e 12% de todos os registros de desastres naturais no Brasil, ficando atrás apenas das estiagens, que somam 51% dos casos. Complementando esse panorama, o Relatório da Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2023 (ANA, 2024) aponta que mais de 1,5 milhão de pessoas foram afetadas por alagamentos, enxurradas e inundações no ano de 2022 em território nacional, revelando a dimensão do problema.

O avanço contínuo da urbanização em diferentes cidades brasileiras exerce forte pressão sobre os sistemas de drenagem urbana, frequentemente já concebidos de forma subdimensionada ou mal planejada. Esse quadro contribui para a ocorrência recorrente de alagamentos, agravando impactos sociais e financeiros. Ao impermeabilizar o solo e reduzir a vegetação, a expansão urbana compromete o equilíbrio hídrico das bacias hidrográficas urbanas, aumentando o volume do escoamento superficial e diminuindo a capacidade de infiltração da água.

Quando o desenvolvimento urbano é realizado sem planejamento adequado e sem considerar os condicionantes naturais, os efeitos tendem a ser mais severos.

A ausência de controle sobre o uso e a ocupação do solo leva à instalação de moradias e empreendimentos em áreas suscetíveis a inundações, potencializando riscos à população. Os prejuízos gerados por eventos hidrológicos extremos não se restringem a danos materiais, como a destruição de casas e infraestrutura, mas também geram altos custos ao poder público com ações emergenciais e reconstrução. A tendência é clara: quanto mais se expandem os assentamentos em áreas vulneráveis e menor é o controle do crescimento urbano, maiores serão as perdas humanas, econômicas e ambientais.

A cidade de União-PI, assim como outros municípios da região centro-norte do estado que margeiam rios como o Parnaíba, Piracuruca e Marataoan, incluindo Teresina, a capital, está constantemente sob risco de inundações nos períodos chuvosos. A esse cenário somam-se problemas de drenagem decorrentes de obras inadequadas, que desconfiguram o escoamento natural, e de intensa impermeabilização do solo, reduzindo a capacidade de infiltração e aumentando o volume do escoamento superficial. A situação é agravada pelo acúmulo de resíduos sólidos, que obstrui canais e galerias, prejudicando o fluxo normal da água e gerando poluição.

A própria história das inundações no espaço urbano desperta interesse científico, na medida em que reforça a necessidade de se criar instrumentos e subsídios técnicos que apoiem o planejamento urbano e a formulação de estratégias para minimizar os impactos desses fenômenos. Nesse sentido, este projeto parte do seguinte questionamento central: quais são as áreas da cidade de União-PI que apresentam maior risco hidrológico associado a alagamentos e inundações?

Diante dessa questão, a investigação dos parâmetros responsáveis por esses eventos e a identificação dos elementos que contribuem para sua ocorrência, podem subsidiar ações voltadas à redução de danos e ao aprimoramento do planejamento e da gestão municipal no enfrentamento desse problema urbano.

Nesse contexto, o uso de ferramentas de geoprocessamento e de metodologias como a análise multicritério torna-se fundamental para compreender a interação entre os fatores físicos e antrópicos que contribuem para a formação de áreas de risco hidrológico. Essas tecnologias permitem integrar diferentes camadas de informação, como dados topográficos, pluviométricos, de uso e cobertura do solo e de infraestrutura urbana, possibilitando uma avaliação espacial precisa e direcionada.

Com base nessa abordagem, é possível não apenas identificar as áreas mais vulneráveis, mas também fornecer subsídios técnicos para que gestores públicos adotem medidas preventivas e corretivas, fortalecendo a resiliência urbana e reduzindo os impactos de eventos extremos sobre a população.

1.2 JUSTIFICATIVA

Diante do constante risco hidrológico ao qual a cidade de União-PI está exposta, aliado à ausência de informações detalhadas sobre a caracterização das bacias urbanas e à carência de medidas efetivas de mitigação por parte dos órgãos públicos frente a eventos hidrológicos extremos, evidencia-se a necessidade urgente de identificar e compreender as áreas com maior propensão a riscos. Essa identificação permitirá o desenvolvimento de ações que vão desde a remoção preventiva de populações residentes em áreas críticas até a adoção de medidas estruturais e não estruturais que promovam a resiliência social e urbana.

A execução deste trabalho justifica-se, portanto, como uma ferramenta estratégica para suprir a lacuna de informações técnicas e científicas sobre a dinâmica do risco hidrológico urbano de União. Além de colaborar com o planejamento estratégico municipal para contenção e mitigação de riscos.

Mais do que conhecer a realidade socioeconômica da população, é essencial compreender quem são e como vivem aqueles que confiaram aos governantes a responsabilidade de zelar pelo bem-estar coletivo. Esse tipo de informação não deve servir apenas para fins cadastrais ou de visualização cartográfica, mas também para subsidiar ações organizacionais voltadas ao planejamento urbano e à gestão territorial. Conforme ressalta Silva (2014), a simples percepção individual do risco, especialmente em eventos de baixa frequência e restritos a locais específicos, não é suficiente para sustentar a criação e implementação de práticas eficientes de gerenciamento.

Além disso, observa-se uma escassez de estudos que abordem o tema utilizando os métodos propostos neste trabalho, particularmente a análise multicritério integrada ao geoprocessamento, através do método AHP, abordando os critérios aqui empregados. Assim, esta pesquisa propõe-se a inovar na abordagem metodológica, oferecendo ferramentas científicas seguras, precisas e replicáveis, capazes de aprofundar a compreensão do fenômeno e, ao mesmo tempo, dialogar

com a realidade local.

O conhecimento gerado contribuirá para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, fornecendo subsídios para a formulação de políticas públicas orientadas à mitigação, prevenção e reparação dos danos causados por inundações e alagamentos. A expectativa é que os resultados obtenham relevância prática, fortalecendo o gerenciamento de riscos hidrológicos em União-PI e aumentando a capacidade adaptativa da cidade diante das mudanças climáticas e da intensificação de eventos extremos.

1.3 HIPÓTESE

Parte-se da hipótese de que determinadas áreas da cidade de União-PI apresentam elevado risco hidrológico, sendo mais suscetíveis à ocorrência de alagamentos e inundações, em razão da combinação de fatores naturais e antrópicos. Entre os fatores naturais, destacam-se a baixa declividade do terreno, a proximidade de corpos hídricos e as características geológicas e pedológicas que influenciam a capacidade de infiltração da água. Entre os fatores antrópicos, incluem-se a ocupação desordenada do solo, a impermeabilização excessiva, as deficiências no sistema de drenagem urbana e a obstrução de canais por resíduos sólidos.

Acredita-se que, por meio da integração de dados geoespaciais, modelagem digital do terreno e aplicação de análise multicritério, será possível identificar, com elevado grau de confiabilidade, os setores urbanos mais vulneráveis. Assim, pressupõe-se que o mapeamento de áreas de risco resultante poderá servir como ferramenta para orientar ações preventivas, mitigadoras e de planejamento urbano, contribuindo para reduzir os impactos humanos, econômicos e ambientais associados a eventos hidrológicos extremos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Analisar a distribuição espacial do risco de alagamentos e inundações na zona urbana consolidada do município de União-PI, a partir da modelagem de um

índice de fatores de risco baseado na integração de variáveis físicas, socioeconômicas e de ocupação urbana, visando subsidiar o planejamento territorial.

1.4.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar a morfologia do relevo da cidade, identificando as principais bacias hidrográficas e a rede de drenagem urbana da zona de estudo;
- Levantar e espacializar, por meio de geoprocessamento, os indicadores físicos, socioeconômicos e de ocupação urbana que compõem os componentes de Suscetibilidade, Exposição e Vulnerabilidade ao risco de alagamentos e inundações;
- Determinar, pelo método do Processo de Análise Hierárquica (AHP), os pesos relativos dos critérios de cada componente e integrá-los, por álgebra de mapas em ambiente SIG, em um único índice de fatores de risco;
- Validar o índice de fatores de risco a partir da comparação espacial com registros de eventos de alagamentos e inundações ocorridos na área urbana de União-PI.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E CONCEITUAL SOBRE OS RISCOS HIDROLÓGICOS EM AMBIENTES URBANOS

Eventos de alagamentos, enchentes e inundações são fenômenos recorrentes, tanto em áreas urbanas quanto rurais, ao redor do mundo. No entanto, esses eventos causam impactos significativamente mais intensos nas áreas urbanas, devido à elevada concentração populacional e à grande quantidade de bens materiais ali presentes. A dinâmica desses processos é influenciada por diversos fatores ambientais, sociais e estruturais, o que torna seu estudo complexo e multidisciplinar.

Além disso, as terminologias utilizadas para descrever os diferentes tipos de eventos relacionados à água em ambientes urbanos são extensas e, muitas vezes, apresentam variações conceituais dependendo do enfoque adotado. É fundamental compreender esses conceitos para que se possa analisar adequadamente as causas, consequências e estratégias de mitigação relacionadas aos riscos hidrológicos.

Dessa forma, esta fundamentação teórica visa apresentar os principais conceitos e referenciais que embasam o estudo dos eventos de inundação e alagamento na cidade de União-PI, especialmente no contexto do geoprocessamento e da análise multicritério aplicada à avaliação de riscos hidrológicos.

Para organizar a discussão, a fundamentação será subdividida em tópicos, que contemplam:

- Terminologias relacionadas a alagamentos, enchentes e inundações;
- Paisagem urbana;
- Legislação aplicável nas esferas federal, estadual e municipal;
- Planejamento urbano e seu papel na prevenção de riscos hidrológicos;
- Drenagem urbana;
- Bacias hidrográficas;
- Gestão de riscos hidrológicos;
- Conceitos de resiliência e vulnerabilidade urbana frente a eventos extremos;

- Fundamentos do geoprocessamento e sua aplicação no estudo de riscos;
- Análise multicritério como ferramenta para avaliação integrada de fatores de risco;

Cada um desses tópicos será aprofundado para fornecer um embasamento sólido que permita compreender as variáveis envolvidas, as metodologias empregadas e as possibilidades de intervenção para mitigação dos impactos das inundações urbanas.

2.1 TERMINOLOGIAS RELACIONADAS A ALAGAMENTOS, ENCHENTES E INUNDAÇÕES

2.1.1 Planícies de Inundação

As planícies de inundação estão diretamente relacionadas ao débito de margens plenas (*bankfull discharge*), definido como a vazão que preenche o canal fluvial até o limite de suas margens, de modo que, acima dessa vazão, ocorre o transbordamento para a planície de inundação (Christofolletti, 1980 apud Kawakubo et al., 2020, p. 185). Ab'Sáber (1989) descreve que essas planícies no Brasil resultam da ação repetitiva das cheias, refletindo a interação entre canal e áreas adjacentes.

Em leitos meandrantos, as planícies tendem a ser mais extensas, favorecendo a dissipação da energia fluvial e a deposição de sedimentos, o que contribui para a fertilidade dos solos (Guerra e Cunha, 2010). Já em leitos entrelaçados, são mais instáveis e fragmentadas, refletindo a dinâmica caótica da sedimentação (Tricart, 1977).

Junk *et al.* (1989) destacam que essas áreas desempenham papel vital na dissipação da energia do fluxo, na deposição de sedimentos e na recarga de aquíferos. Nanson e Croke (1992) acrescentam que a formação e evolução das planícies variam de acordo com processos de avulsão ou lateralização de canais, sendo habitats relevantes para a biodiversidade (Ward *et al.*, 2002).

De modo geral, a planície de inundação é uma feição deposicional do vale fluvial, relacionada ao regime hidrológico e ao clima da bacia hidrográfica. Em

situações de equilíbrio, há um balanço entre entrada e saída líquida de sedimentos, podendo alterações tectônicas ou hidrológicas provocar a formação de terraços ou aggradação (Leopold; Wolman; Miller, 1964).

2.1.2 Inundações, Enchentes, Cheias e Alagamentos

A literatura especializada apresenta definições diversas e, por vezes, sobrepostas acerca dos termos inundação, enchente, cheia e alagamento, o que dificulta a compreensão clara por parte de leitores não familiarizados com a temática.

a) Inundações

As inundações consistem no transbordamento de corpos d'água para áreas adjacentes normalmente secas (De Sá *et al.*, 2015; Pereira, 2013). Podem ser classificadas em rápidas, associadas a chuvas intensas e drenagem deficiente, e lentas, resultantes de chuvas prolongadas ou do derretimento de neve (Silva *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2020). A USGS (2015) diferencia ainda as inundações repentinas (*flash floods*), que se manifestam em poucas horas, geralmente sem tempo de reação adequado.

Apesar dessa conceituação, Guerra e Guerra (2003) tratam “inundação” como sinônimo de “alagado”, definindo-a como a área ocupada pela água logo após a enchente, sem estabelecer distinção clara entre os dois termos. Essa ambiguidade conceitual reforça as dificuldades de compreensão para leitores fora da área de hidrologia.

b) Enchentes

As enchentes são definidas por Tucci (2005) como transbordamentos temporários das águas de um corpo hídrico, resultantes de chuvas intensas e contínuas que excedem a capacidade de absorção do solo e de escoamento. De forma semelhante, Suguio (1998) descreve a enchente como a situação em que a água extravasa do leito fluvial e dos canais artificiais, invadindo terras baixas adjacentes, em eventos geralmente anuais ou bienais.

Villela e Mattos (1975) acrescentam que as enchentes podem ser agravadas

pela abertura de comportas de reservatórios ou pelo rompimento de barragens, destacando que só provocam inundações quando o volume de água excede a capacidade do canal. Em áreas urbanas, conforme Freitas *et al.* (2022), as enchentes podem ser vistas como um subgrupo das inundações, com características específicas relacionadas ao meio urbano.

c) Cheias

O termo cheia refere-se ao aumento do nível da água em corpos hídricos, sendo um processo natural do regime fluvial. Monteiro *et al.* (2017) a descrevem como a elevação gradual do nível da água, que pode provocar transbordamentos e impactar áreas ribeirinhas. Para Tucci (2005), trata-se de um aumento temporário e significativo do nível da água, frequentemente associado a chuvas intensas.

Nesse sentido, a cheia está relacionada à elevação do nível da água em decorrência do aumento da vazão do curso d'água. Quando a descarga do rio se eleva a ponto de exceder a capacidade do canal, ocorre o extravasamento das águas para as áreas adjacentes, caracterizando o processo de inundação (Teixeira *et al.*, 2000, p. 212). Dessa forma, uma cheia pode resultar em inundação quando a elevação do nível da água ultrapassa a capacidade de condução do canal.

Segundo Silveira e Betim (2007), as cheias refletem o comportamento hidrológico de uma bacia, quando a precipitação excede a capacidade de escoamento. No contexto internacional, Smith e Ward (1998) as entendem como processos naturais de aumento rápido ou gradual do nível das águas em rios, lagos ou oceanos, com impactos sobre ecossistemas e comunidades humanas.

A noção de cheia está diretamente relacionada ao regime hídrico, caracterizado pelas oscilações sazonais de elevação (cheia) e redução (vazante) do nível das águas, fenômeno típico de cursos d'água tropicais. Essas flutuações influenciam não apenas a dinâmica hidrológica, mas também a organização espacial das comunidades ribeirinhas e a configuração ambiental adjacente.

d) Alagamentos

Os alagamentos diferenciam-se das inundações e cheias por sua relação direta com a infraestrutura urbana. Segundo Diniz *et al.* (2016), ocorrem quando os sistemas de drenagem não conseguem escoar volumes excessivos de água,

provocando acúmulo em ruas e áreas baixas. Essa definição é reforçada por De Sá *et al.* (2015), que entendem os alagamentos como fenômenos típicos de áreas urbanizadas.

Brasil (2013) também associa o termo a eventos de escoamento urbano insuficiente, destacando ainda o conceito de enxurrada, entendida como escoamento superficial de alta energia em pequenas bacias de relevo acidentado, capaz de gerar transbordamentos bruscos e com elevado potencial destrutivo.

Diferentemente das inundações e enchentes, os alagamentos são tratados na literatura de maneira mais superficial, sendo vistos como fenômenos pontuais e associados diretamente à urbanização desordenada e às chuvas de alta intensidade.

e) Relações entre os fenômenos

A inter-relação entre esses conceitos é evidente, já que muitos eventos apresentam características sobrepostas. Silva *et al.* (2021) destacam que os fenômenos não são mutuamente exclusivos, podendo ocorrer simultaneamente. Por exemplo, uma cheia em um rio pode gerar inundações em sua planície aluvial e, ao mesmo tempo, ocasionar alagamentos em áreas urbanas pela falha dos sistemas de drenagem.

A compreensão desses fenômenos também é influenciada pelo contexto geográfico e climático. Pereira *et al.* (2020) e Sousa *et al.* (2022) enfatizam que topografia, uso do solo e variabilidade climática são determinantes na intensidade e na forma como tais eventos se manifestam.

Assim, a análise integrada das definições e relações entre inundações, enchentes, cheias e alagamentos evidencia a necessidade de uma abordagem multidimensional. Monteiro *et al.* (2017) e Carvalho *et al.* (2018) reforçam que, além dos aspectos físicos, é imprescindível considerar fatores sociais e urbanos, de modo a aprimorar a gestão e a resiliência diante de eventos hidrológicos extremos. A Figura 1– Diferenças entre as terminologias, apresenta essas diferenças.

Figura 1 – Diferenças entre as terminologias



Fonte: Adaptada de Rodrigues (2022).

No município de União-PI, esses fenômenos podem ser observados de forma articulada às características físicas e à dinâmica de ocupação da área urbana. As cheias que ocorreram no rio Parnaíba em 2009 correspondem à elevação do nível das águas em decorrência do aumento da vazão, resultaram em inundações quando a capacidade de condução do canal foi excedida fazendo com que suas águas alcançassem áreas adjacentes deixando um bairro inteiro da cidade debaixo da água.

Além da influência da dinâmica fluvial, nas áreas urbanizadas, a ocorrência de alagamentos está relacionada à concentração do escoamento superficial das águas pluviais e à capacidade dos sistemas de drenagem em conduzi-las (Tucci, 2008, p. 105-106). Dessa forma, os conceitos de cheia, inundação e alagamento apresentam processos distintos, porém relacionados às diferentes formas de manifestação das águas no território urbano de União-PI, justificando sua consideração na análise dos riscos hidrológicos na área urbana do município.

2.2 PAISAGEM URBANA

A paisagem urbana de União-PI é fruto de um processo histórico de ocupação e modificação do território, vinculado às características naturais e às formas de apropriação do espaço pela sociedade. O surgimento da comunidade local teve suas origens no início do século XIX, com a instalação da outrora chamada Fazenda Estanhado às margens do rio Parnaíba e a construção de uma capela, a qual

impulsionou o desenvolvimento populacional na região. Em 1853, o povoado foi elevado à categoria de vila, com a denominação de União, e, em 1889, passou à condição de cidade (Ferreira *et al.*, 1959, p. 647).

Sua fundação às margens do rio Parnaíba constitui um fator significativo na formação histórica e na configuração geográfica da cidade, uma vez que a ocupação primária esteve vinculada ao contexto fluvial. A concessão de terras situadas às margens do rio para a constituição do patrimônio da vila também evidencia a relação entre a formação do núcleo urbano e o espaço físico ocupado (Ferreira *et al.*, 1959). Ao longo do processo de expansão urbana, a ocupação do território modificou as características da paisagem, resultando na combinação de elementos naturais e construídos que caracterizam atualmente a área urbana do município.

2.2.1 Espaço humanizado e transformações antrópicas

Bertrand (1971) define o espaço urbano como um espaço humanizado, resultado do desenvolvimento das atividades humanas e de contínuas adaptações antrópicas. Essas adaptações incluem a introdução de estruturas técnicas, jurídicas e administrativas, que sistematizam a utilização do solo e moldam a paisagem urbana ao longo do tempo. Essa perspectiva evidencia que o espaço urbano não é estático, mas está constantemente sendo transformado pela interação entre fatores naturais e decisões humanas.

A compreensão dessas transformações é essencial para a análise de fenômenos hidrológicos urbanos, já que a intervenção humana altera significativamente os fluxos de água, os padrões de drenagem e os riscos associados a enchentes e alagamentos. As modificações podem ocorrer de forma planejada, como em projetos de macrodrenagem, ou de forma desordenada, resultando em impactos sociais, econômicos e ambientais.

2.2.2 Urbanização, impermeabilização e escoamento superficial

Segundo Jabur (2010) é fundamental conhecer a chuva excedente, especialmente em pequenas bacias hidrográficas urbanas, onde a impermeabilização do solo aumenta o escoamento superficial. Esse escoamento representa a parcela da água precipitada que não infiltra no solo e contribui

diretamente para o aumento das vazões nos rios e para a ocorrência de cheias urbanas.

A urbanização altera o comportamento natural das bacias hidrográficas. Como observa Tucci (1995) a tendência de crescimento das cidades é ocorrer no sentido de jusante para montante, influenciada pelas características do relevo e pelos sistemas de drenagem existentes.

Quando os loteamentos são projetados, frequentemente as exigências municipais limitam-se a garantir a drenagem do próprio loteamento, sem considerar os impactos sobre o sistema de macrodrenagem da cidade como um todo.

Essa abordagem fragmentada resulta em maior risco de enchentes, já que a capacidade de escoamento do sistema urbano pode ser superada durante períodos de precipitação intensa. Consequentemente, áreas mais baixas e populações vulneráveis acabam sendo mais afetadas, refletindo a relação direta entre planejamento urbano inadequado e aumento da vulnerabilidade social.

2.2.3 Sistemas de drenagem urbana e gestão do espaço

Righetto (2009) destaca que a organização do espaço urbano depende da aplicação de legislações em níveis federal, estadual e municipal. Um sistema de drenagem urbana planejado traz benefícios importantes, como:

- Facilitação da manutenção das galerias e canais de drenagem;
- Melhoria do tráfego de veículos durante eventos de chuva;
- Redução de custos na implantação de novos loteamentos;
- Contribuição para a saúde e segurança da população.

Porém, a manutenção precária desses sistemas, muitas vezes causada por falhas na limpeza urbana, compromete a eficiência do escoamento superficial, aumentando a ocorrência de alagamentos e enchentes urbanas. Essa realidade evidencia a necessidade de políticas públicas integradas, que considerem não apenas a construção de infraestrutura, mas também a manutenção contínua e adequada de sistemas de drenagem.

2.2.4 Vulnerabilidade urbana e risco ambiental

Silva (2014) ressalta a importância de informações georreferenciadas sobre

áreas de risco e vulnerabilidade ambiental. Conhecer a distribuição espacial da população e as características físicas do território é essencial para o planejamento urbano, permitindo a criação de estratégias eficazes de prevenção e mitigação de riscos.

A percepção individual do risco não é suficiente para orientar políticas públicas, especialmente em eventos de baixa frequência ou restritos a locais específicos. A falta de dados detalhados compromete a capacidade de gestão urbana e aumenta a exposição da população a desastres hidrológicos.

Veyret (2007) define vulnerabilidade como a relação entre a magnitude do impacto previsível de um evento e os alvos potencialmente afetados. A autora enfatiza a complexidade do mapeamento da vulnerabilidade, devido à diversidade de variáveis envolvidas, que vão desde características físicas do território até fatores sociais, econômicos e demográficos da população.

2.2.5 Inter-relação entre urbanização, drenagem e vulnerabilidade

A análise da paisagem urbana em transformação evidencia que o crescimento urbano, a impermeabilização do solo e a vulnerabilidade social estão intimamente ligados à ocorrência de eventos hidrológicos extremos. O aumento de áreas impermeáveis intensifica o escoamento superficial, sobrecarregando os sistemas de drenagem e elevando a frequência de enchentes e alagamentos.

Além disso, a ocupação de áreas de risco sem planejamento adequado aumenta a exposição da população a impactos sociais e econômicos. A integração entre planejamento urbano, manutenção da infraestrutura e mapeamento da vulnerabilidade é, portanto, fundamental para reduzir riscos e aumentar a resiliência das cidades.

Essa abordagem multidimensional permite compreender a paisagem urbana como resultado de interações complexas entre fatores naturais e antrópicos, reforçando a necessidade de políticas públicas e ações de gestão que considerem simultaneamente os aspectos físicos, sociais e administrativos da cidade.

2.3 LEGISLAÇÃO APLICÁVEL À GESTÃO DE RISCOS HIDROLÓGICOS URBANOS: ASPECTOS FEDERAL, ESTADUAL E MUNICIPAL

A gestão de riscos hidrológicos urbanos em União-PI deve se apoiar em um

conjunto de normas legais que regulam a ocupação do solo, o uso da água e a infraestrutura urbana. A legislação federal, estadual e municipal estabelece diretrizes essenciais para o planejamento urbano, prevenção de inundações e alagamentos e implementação de medidas corretivas em áreas suscetíveis a eventos hidrológicos extremos.

A Lei nº 10.257/2001, o Estatuto da Cidade, regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal, estabelecendo princípios e instrumentos da política urbana voltados ao desenvolvimento sustentável das cidades. Entre suas diretrizes, destaca-se a obrigatoriedade dos municípios elaborarem e implementarem seus Planos Diretores, que devem ser revisados periodicamente. Esses instrumentos orientam a ocupação do solo, o controle de áreas de risco e a implantação de sistemas de infraestrutura urbana, incluindo a drenagem, contribuindo para a redução de vulnerabilidades a eventos hidrológicos (Brasil, 2001).

Além disso, a Lei nº 9.433/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, reforça a necessidade de gestão integrada das águas, com o objetivo de prevenir e minimizar impactos causados por eventos extremos e orientar o uso sustentável dos recursos hídricos (Brasil, 1997).

No âmbito estadual, o Piauí dispõe de normas que orientam a ocupação territorial e a regularização de áreas urbanas e rurais. A Lei nº 7.294/2019 trata da política estadual de regularização das ocupações em terras públicas e devolutas, estabelecendo critérios para o uso do solo de forma planejada e segura, prevenindo riscos ambientais e hidrológicos (Estado do Piauí, 2019).

Essa legislação é relevante para o controle de ocupações irregulares em áreas de risco, incluindo margens de rios e bacias urbanas, ajudando a reduzir o impacto de alagamentos e enchentes sobre a população.

Em União-PI, as normas municipais desempenham papel central na prevenção e mitigação de riscos hidrológicos. O Código de Obras e Posturas, instituído pela Lei Municipal nº 622/2014, estabelece padrões para edificações, drenagem e impermeabilização do solo, assegurando que novos empreendimentos urbanos não comprometam a capacidade de escoamento das águas pluviais (União, 2014).

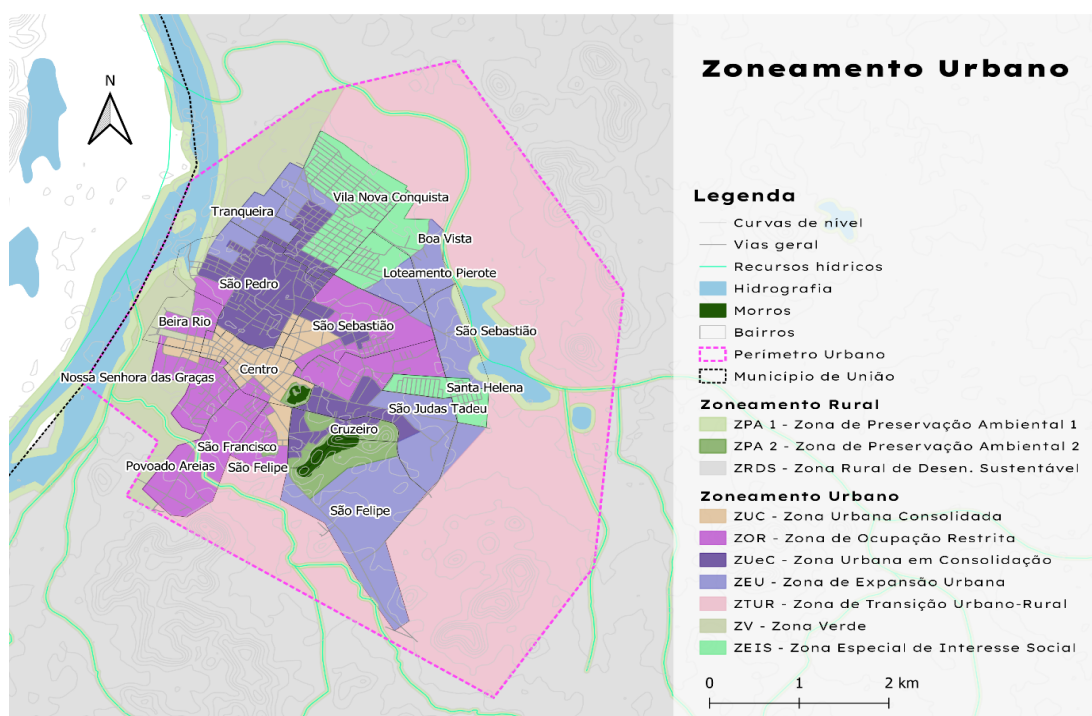
Complementarmente, o Plano Diretor Municipal, aprovado pela Lei nº 886/2024, define objetivos urbanísticos, ambientais, sociais e econômicos para o desenvolvimento sustentável da cidade. Ele estabelece zonas de uso do solo, áreas

de proteção ambiental e diretrizes para infraestrutura urbana, incluindo medidas específicas para a mitigação de riscos de inundações e alagamentos (União, 2024).

A articulação entre Código de Obras e Plano Diretor garante que o crescimento urbano seja planejado e que as áreas vulneráveis recebam atenção especial, permitindo ao município adotar estratégias de prevenção mais eficazes.

A análise do zoneamento urbano do município, conforme a Figura 2 – Mapa do Zoneamento Urbano de União, representado no Plano Diretor, evidencia a materialização dos instrumentos de ordenamento territorial previstos na legislação federal e municipal. As zonas de preservação ambiental (ZPA 1 e ZPA 2), bem como as áreas de ocupação restrita (ZOR), configuram-se como espaços estratégicos para a proteção de ecossistemas frágeis, incluindo margens de cursos d'água e áreas sujeitas a inundações, desempenhando função essencial na mitigação de riscos hidrológicos. Por sua vez, as zonas urbanas em consolidação (ZUEC) e de expansão urbana (ZEU) correspondem a territórios cuja ocupação demanda observância estrita às diretrizes do Código de Obras e do Plano Diretor, sobretudo no que se refere à impermeabilização do solo, à drenagem e à implantação de infraestrutura adequada.

Figura 2 – Mapa do Zoneamento Urbano de União



Fonte: Prefeitura Municipal de União (2024).

O zoneamento ainda contempla zonas de transição urbano-rural (ZTUR) e zonas de interesse social (ZEIS), as quais exigem planejamento integrado que assegure tanto a função social da cidade quanto a redução de vulnerabilidades socioambientais. Dessa forma, o zoneamento urbano de União-PI não se limita a delimitar usos do solo, mas constitui um instrumento normativo e técnico fundamental para a operacionalização das políticas urbanas, garantindo que a expansão e o adensamento urbano ocorram de forma planejada, sustentável e compatível com a prevenção de inundações e alagamentos.

A legislação vigente deve ser aplicada de forma articulada com ferramentas de geoprocessamento, possibilitando a análise espacial detalhada das áreas de risco. O uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite a identificação de zonas vulneráveis, a simulação de cenários de inundação e o planejamento de intervenções. Dessa forma, a integração entre normas legais e tecnologia fortalece a gestão do risco hidrológico, promovendo medidas preventivas, a proteção da população e a sustentabilidade urbana.

Além disso, o respeito às legislações permite que políticas públicas sejam implementadas de forma sistemática, garantindo que obras e planos urbanos sigam padrões técnicos e ambientais, aumentando a resiliência da cidade frente a eventos extremos.

2.4 PLANEJAMENTO URBANO E SEU PAPEL NA PREVENÇÃO DE RISCOS HIDROLÓGICOS

O planejamento, conforme discutido na literatura, é compreendido como “um processo técnico instrumentado para transformar a realidade existente no sentido de objetivos previamente estabelecidos” (Silva, 2006, p. 89). Essa concepção sublinha o caráter deliberado e normativo do planejamento urbano, orientado por diagnósticos, metas e ações estruturadas, o que o torna voz legítima na abordagem dos desafios impostos pelas inundações e alagamentos em contextos urbanos.

Historicamente, o conceito de planejamento urbano emergiu no século XIX como resposta ao crescimento acelerado das cidades, sobretudo na Europa e nos Estados Unidos. Ribeiro e Cardoso (1994) assinalam que tal prática foi impulsionada por reformas higienistas e por uma postura modernizadora, dando origem ao neologismo “urbanismo”, incorporado como prática estética, funcional e de controle

social. Topalov (1991) também analisa esse movimento moderno europeu, enfatizando a dimensão civilizacional do urbanismo, baseado em premissas de ordem, salubridade e racionalismo técnico, que se projetaram na normativa espacial das cidades.

No caso brasileiro, Villaça (1999) propõe uma periodização clara dessa trajetória histórica, dividida em três fases:

(1) **1875–1930:** caracterizada pelos “planos de embelezamento”, que buscavam a remodelação de cidades como o Rio de Janeiro com base em paradigmas europeus, recolocando a paisagem urbana como objeto de ação estatal. Nesse contexto, o urbanismo era visto como uma disciplina estética e higienista, voltada ao controle sanitário e à recomposição monumental do espaço urbano. Villaça (1999, p. 205) destaca que o termo “urbanismo” “aparece inicialmente associado à ‘arte urbana’, à ‘arquitetura das cidades’, ao ‘embelezamento urbano’”. Em tal período, intervenções como o Plano Pereira Passos são emblemáticas dessa lógica de poder simbólico e funcional.

(2) **1930–1992:** marcado pela consolidação das políticas urbanas e pela emergência de instrumentos como planos diretores, zoneamentos e códigos urbanísticos. Villaça (1999) observa que “a ideologia do planejamento enquanto técnica de base científica, indispensável para a solução dos chamados problemas urbanos” (Villaça, 1999, p. 182) se consolida como discurso dominante. Já o período dos “superplanos” (1965–1971) e o do “plano sem mapa” (1971–1992) revelam rupturas entre planejar e implementar, com planos formalmente sofisticados, mas frequentemente dissociados da realidade e das dinâmicas sociais concretas (Villaça, 1999, p. 204-207).

(3) **A partir de 1992:** período inaugurado pela promulgação da Constituição Federal de 1988 e consolidado com a aprovação do Estatuto da Cidade (2001), que conferiu vetores normativos e participativos ao planejamento urbano. O Estatuto estabeleceu o plano diretor como instrumento obrigatório das políticas urbanas, requerendo participação social e alinhamento com funções sociais da cidade, incluindo a prevenção de riscos ambientais, como inundações.

Essa evolução histórica indica que o planejamento urbano no Brasil se constituiu tanto como reação a crises urbanas quanto como instrumento de legitimação de interesses dominantes. No primeiro período, o embasamento técnico e estético serviu à segregação socioespacial, enquanto os planos seguintes se

tornaram dispositivos de controle e reprodução de desigualdades, embutidos em uma lógica tecnocrática. A crítica de que “os interesses imobiliários estavam por detrás dos grandes projetos urbanos” (Villaça, 1999, p. 195) evidencia essa dimensão ideológica do planejamento.

No contexto da gestão de riscos, essa historicidade assume importância estratégica: o planejamento incrementado pelo Estatuto da Cidade e pela revisão de planos diretores (como o de União-PI) deve superar a mera retórica técnica e incorporar a noção de vulnerabilidade geográfica e social. O processo técnico não pode ser neutro, como alerta Silva (2006), o planejamento é intencional, e seu desenho pode tanto reforçar estruturas de desigualdade quanto oferecer alternativas transformadoras. O desafio está em instrumentalizar o planejamento urbano para que, em vez de servir a lógicas hegemônicas, atue em prol da proteção de populações vulneráveis frente a fenômenos hidrológicos extremos.

Para legitimar essa proposta, é necessário que o planejamento urbano se torne um mecanismo democrático e sensível às especificidades territoriais. No caso de União-PI, por exemplo, a aplicação do plano diretor municipal, aliada a códigos de obras e zoneamentos adequados, direciona o uso do solo em áreas suscetíveis e permitir estratégias sustentáveis de drenagem e impermeabilização. Isso exige que o planejamento seja não apenas técnico, mas também normativo e inclusivo; aspecto que a legislação urbanística vigente já propicia, mas que só ganha efetividade se implementada com monitoramento, participação cidadã e articulação com ferramentas espaciais como o geoprocessamento.

Em síntese, o planejamento urbano, conforme argumentado pelos autores examinados, passa de instrumento de embelezamento e controle social para um corpo normativo mais consciente e participativo, cuja eficácia depende da capacidade de articular técnica, legislação e justiça territorial. Quando aplicado com essa sensibilidade, torna-se peça-chave na gestão de riscos urbanos, capaz de orientar decisões sobre uso do solo, infraestrutura e regulação ambiental, fortalecendo a resiliência das cidades diante de eventos extremos.

O planejamento urbano tem se consolidado como uma das ferramentas mais importantes para compreender e intervir nas dinâmicas que moldam as cidades contemporâneas. Mais do que um instrumento técnico e administrativo, trata-se de uma prática política e social que influencia diretamente a organização do espaço e a qualidade de vida da população. Nesse sentido, a sua relação com a prevenção de

riscos hidrológicos é fundamental, uma vez que a urbanização desordenada é um dos fatores que mais intensificam eventos de inundação e alagamento no Brasil.

De acordo com Villaça (1999) planejar significa não apenas prever cenários futuros, mas intervir estrategicamente no presente, transformando realidades urbanas e evitando que os problemas atuais se perpetuem. Essa perspectiva reforça a ideia de que o planejamento urbano deve ser entendido como um processo de transformação social, que articula dimensões técnicas, jurídicas e políticas, buscando construir cidades mais equilibradas, sustentáveis e resilientes.

A história do planejamento urbano no Brasil está ligada a diferentes momentos históricos. Ribeiro e Cardoso (1994) identificam que, no século XIX, os primeiros planos urbanísticos surgiram inspirados em modelos europeus, especialmente franceses, com foco no embelezamento e na higienização. Esse movimento estava em consonância com a realidade das cidades europeias, que enfrentavam problemas de salubridade e precisavam de intervenções estéticas e sanitárias. No entanto, no Brasil, esse modelo se adaptou de maneira peculiar, voltado sobretudo à monumentalidade e à tentativa de modernização das áreas centrais.

Segundo os mesmos autores, com o avanço da industrialização e da urbanização, principalmente a partir da década de 1930, o planejamento urbano passou a ter caráter normativo, consolidando-se na forma de planos diretores. Entretanto, esses instrumentos, muitas vezes, não dialogavam com a realidade local, sendo elaborados de maneira distante das necessidades concretas da população. Foi somente após a Constituição Federal de 1988 e, especialmente, com o Estatuto da Cidade (Lei nº 10.257/2001), que o planejamento urbano adquiriu um caráter mais democrático e participativo. A partir desse marco jurídico, consolidaram-se princípios como a função social da propriedade, a justa distribuição dos benefícios e ônus da urbanização e a gestão democrática das cidades.

Entretanto, apesar desses avanços legais e institucionais, as cidades brasileiras continuam enfrentando desafios relacionados à urbanização desordenada. A ocupação de áreas de risco, como margens de rios, encostas e várzeas, aliada à impermeabilização excessiva do solo, compromete o ciclo hidrológico e agrava a ocorrência de enchentes. Tucci (2003) explica que o ciclo hidrológico urbano sofre alterações profundas devido à canalização de cursos d'água, à supressão da vegetação e à pavimentação excessiva, que reduzem a infiltração da água e

aumentam a velocidade do escoamento superficial.

Em obra posterior, Tucci (2005) reforça que a drenagem urbana precisa estar integrada ao planejamento do uso e ocupação do solo. Para o autor, de nada adianta construir galerias pluviais ou ampliar canais se, ao mesmo tempo, o modelo de ocupação urbana permanecer desordenado. Ele argumenta que medidas estruturais, como a construção de diques, barragens e canais, têm efeito limitado se não forem acompanhadas de medidas não estruturais, como legislações específicas, zoneamento e instrumentos de gestão territorial. Nesse sentido, o autor conclui que “a drenagem urbana deve ser concebida de modo integrado ao planejamento do uso do solo, sob pena de se perpetuar um ciclo de vulnerabilidade” (Tucci, 2005, p. 47).

Outro aspecto fundamental é o uso de soluções sustentáveis. Silveira e Tucci (2011a) destacam alternativas como telhados verdes, jardins de chuva, pavimentos permeáveis e reservatórios de infiltração, que, além de reduzirem o volume de escoamento superficial, contribuem para a recarga dos aquíferos e a melhoria do microclima urbano. Diferentemente das obras puramente estruturais, essas medidas integram-se ao ambiente natural e promovem uma relação mais equilibrada entre a cidade e os processos hidrológicos.

No entanto, como lembra Maricato (2011), qualquer debate sobre planejamento urbano no Brasil deve considerar a profunda desigualdade social que caracteriza o processo de urbanização. Grande parte da população vive em áreas irregulares, sem infraestrutura adequada, exposta a riscos de inundações e alagamentos. A autora critica o modelo de “urbanismo espetáculo”, voltado à monumentalidade e à valorização imobiliária, em detrimento das reais necessidades da maioria da população. Para ela, o planejamento urbano deve ser entendido como uma política pública orientada para a justiça social e para a proteção das populações vulneráveis.

Portanto, a prevenção de riscos hidrológicos depende de um planejamento urbano articulado e multidimensional. De um lado, é preciso assegurar a aplicação de instrumentos jurídicos e urbanísticos previstos no Estatuto da Cidade e nos planos diretores. De outro, é necessário incorporar soluções técnicas sustentáveis, baseadas em evidências científicas, que favoreçam a infiltração, a drenagem natural e o equilíbrio do ciclo hidrológico. E, sobretudo, como destacam Villaça (1999) e Maricato (2011), é imprescindível que o planejamento urbano se constitua como prática democrática e inclusiva, que enfrente as desigualdades e proteja a

população mais exposta aos riscos ambientais.

Constata-se, assim, que o planejamento urbano tem papel estratégico na prevenção de riscos hidrológicos. Ele não se limita a organizar o espaço físico da cidade, mas envolve também escolhas políticas, sociais e ambientais que definem quem terá acesso a uma cidade segura e sustentável. Planejar, como lembra Villaça (1999), é intervir no presente com vistas à transformação do futuro, garantindo que os problemas atuais não se perpetuem e que novas vulnerabilidades não sejam produzidas.

2.5 DRENAGEM URBANA

A drenagem urbana é um dos componentes centrais da infraestrutura das cidades, pois está diretamente ligada à capacidade de absorção, transporte e destinação adequada das águas pluviais. Trata-se de um processo que busca minimizar os impactos negativos da urbanização sobre o ciclo hidrológico, prevenindo inundações, alagamentos e erosões que afetam tanto a infraestrutura urbana quanto a qualidade de vida da população. De acordo com Canholi (2005), a drenagem urbana deve ser entendida não apenas como um conjunto de obras de engenharia, mas como parte de uma estratégia integrada de planejamento territorial que considera o crescimento desordenado das cidades e a pressão sobre os recursos hídricos.

Com a expansão urbana, o ciclo natural da água é profundamente modificado. Superfícies antes permeáveis, como solos naturais e vegetação, são substituídas por pavimentos impermeáveis, reduzindo a infiltração e aumentando o escoamento superficial. Esse desequilíbrio gera sobrecarga nos sistemas de drenagem e intensifica os riscos hidrológicos, especialmente em áreas de ocupação irregular. Tucci (2008) ressalta que as enchentes urbanas são, em grande medida, consequência da falta de planejamento, da ausência de manutenção nos sistemas existentes e da ocupação de áreas ambientalmente frágeis, como várzeas e margens de rios.

A drenagem urbana pode ser abordada por meio de medidas estruturais e não estruturais. As medidas estruturais englobam obras físicas, como galerias pluviais, canais, reservatórios de retenção e contenção, diques e sistemas de bombeamento. São fundamentais para ampliar a capacidade de escoamento das

águas em eventos extremos, mas exigem altos custos de implantação e manutenção. Já as medidas não estruturais correspondem a estratégias de gestão, planejamento e políticas públicas, como o zoneamento urbano, a criação de áreas de preservação permanente e o incentivo a práticas de infiltração local da água. Para Silveira e Tucci (2011b), a eficácia da drenagem depende da combinação equilibrada entre esses dois tipos de medidas, o que permite não apenas mitigar os impactos imediatos, mas também reduzir a vulnerabilidade da cidade em longo prazo.

Um aspecto importante da drenagem urbana contemporânea é sua relação direta com a sustentabilidade. A chamada drenagem urbana sustentável propõe soluções que buscam conciliar o escoamento das águas pluviais com a preservação do meio ambiente e a qualidade de vida urbana. Exemplos disso são os jardins de chuva, telhados verdes, pavimentos permeáveis, reservatórios de infiltração e bacias de retenção natural, que permitem o controle descentralizado do escoamento. Essas técnicas, conhecidas como práticas baseadas na natureza, são cada vez mais recomendadas em países que enfrentam desafios de urbanização acelerada. Canholi (2014) destaca que a adoção dessas soluções reduz custos com obras convencionais, além de melhorar o microclima urbano e promover a recarga dos aquíferos.

Outro elemento que merece destaque é a integração da drenagem com o planejamento urbano. Historicamente, o Brasil desenvolveu seus sistemas de drenagem de forma fragmentada, muitas vezes limitada a ações emergenciais diante de inundações. Essa abordagem reativa compromete a eficiência das políticas públicas, pois trata apenas os sintomas e não as causas estruturais dos problemas. Maricato (2000) argumenta que as desigualdades urbanas se refletem na drenagem: enquanto áreas centrais dispõem de infraestrutura consolidada, bairros periféricos e irregulares convivem com alagamentos recorrentes. Assim, a drenagem urbana deve ser tratada como um direito coletivo, garantindo que as populações mais vulneráveis não sejam sistematicamente expostas a riscos.

Nesse sentido, a tecnologia tem desempenhado papel relevante na formulação de políticas de drenagem urbana. O uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), ferramentas de geoprocessamento e modelagem hidrológica permite identificar áreas de risco, prever cenários de inundação e planejar intervenções mais eficazes. Tucci (2012) salienta que a aplicação de tecnologias digitais no planejamento hídrico urbano é indispensável para cidades que buscam se

adaptar às mudanças climáticas e aos eventos extremos cada vez mais frequentes.

Por fim, é preciso compreender a drenagem urbana como parte de uma política pública ampla, que envolva não apenas engenheiros e gestores, mas também a sociedade civil. A educação ambiental, os programas de conscientização e a participação comunitária na gestão das águas urbanas são ferramentas importantes para a efetividade das ações. Isso porque, sem o engajamento social, medidas como a preservação de áreas verdes e o descarte correto de resíduos sólidos, fatores diretamente relacionados à eficiência da drenagem, tornam-se ineficazes. Portanto, a drenagem urbana deve ser entendida como uma responsabilidade compartilhada, que exige planejamento, investimento contínuo e integração com as demais dimensões da cidade.

2.6 BACIAS HIDROGRÁFICAS: FUNDAMENTOS, DINÂMICAS E GESTÃO INTEGRADA

No campo da hidrologia, Tucci (2007, p. 22) destaca que “as bacias hidrográficas são sistemas abertos, influenciados por fatores naturais, como geologia, relevo, solos, cobertura vegetal e clima, bem como por fatores antrópicos, como urbanização, uso agrícola intensivo e intervenções de infraestrutura”. Esses fatores afetam diretamente o balanço hídrico, a qualidade da água e a dinâmica dos ecossistemas associados.

As bacias hidrográficas são unidades fundamentais para a compreensão e gestão dos recursos hídricos, pois representam áreas naturais que captam e direcionam a água da precipitação para um exutório comum, geralmente um curso d'água principal. Essa delimitação topográfica confere à bacia um caráter sistêmico, permitindo a análise integrada dos fluxos hídricos, sedimentares, energéticos e de matéria (Christofolletti, 1980, p. 15).

A análise geomorfológica das bacias hidrográficas permite compreender a evolução do relevo, a dinâmica erosiva e os processos de transporte e deposição de sedimentos. Ross (2000) enfatiza que a compartimentação do relevo dentro das bacias influencia diretamente o regime hidrológico, “determinando velocidades de escoamento, áreas de infiltração e suscetibilidade a inundações” (Ross, 2000, p. 45). Além disso, a geomorfologia das bacias condiciona o potencial de recarga dos aquíferos e a disponibilidade hídrica de longo prazo.

Do ponto de vista ecológico, as bacias hidrográficas funcionam como corredores ecológicos que conectam diferentes habitats. Tundisi e Tundisi (2008) afirmam que:

[...] os ecossistemas aquáticos inseridos nas bacias hidrográficas atuam como integradores de processos ambientais, refletindo tanto a qualidade da paisagem quanto os impactos do uso e ocupação do solo. A degradação das matas ciliares, a poluição difusa de origem agrícola e o lançamento de efluentes urbanos comprometem a integridade ecológica de toda a bacia (Tundisi e Tundisi, 2008, p. 78).

A Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997) adota a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão, visando integrar diferentes interesses, urbanos, industriais, agrícolas e ecológicos, em torno de um recurso comum: a água. Souza (2013) destaca que a gestão de bacias hidrográficas exige mecanismos participativos, nos quais comitês e conselhos de bacia atuem na mediação entre os diversos setores sociais e econômicos, favorecendo uma governança descentralizada e democrática.

O avanço das geotecnologias ampliou significativamente as possibilidades de análise das bacias hidrográficas. Xavier-da-Silva (2001, p. 58) observa que os sistemas de informações geográficas (SIG) permitem realizar mapeamentos detalhados, “identificar áreas de recarga e descarga, modelar cenários de escoamento superficial e subsidiar políticas públicas de uso do solo” (Xavier-da-Silva, 2001, p. 58). Aliados ao sensoriamento remoto, esses recursos tornam-se ferramentas fundamentais para a gestão integrada das águas, possibilitando o monitoramento em larga escala e em tempo quase real.

Em termos de serviços ecossistêmicos, as bacias hidrográficas desempenham papel essencial na manutenção da qualidade ambiental e do bem-estar humano. Daily (1997) aponta que:

[...] a regulação do ciclo hidrológico, a purificação da água, o controle da erosão, a manutenção da fertilidade do solo e a provisão de habitats estão diretamente relacionados ao bom funcionamento das bacias. A degradação desses sistemas compromete não apenas a disponibilidade de recursos hídricos, mas também a resiliência das populações frente às mudanças climáticas. (Daily, 1997, p. 45)

No contexto das mudanças globais, Bates *et al.* (2008) destacam que “as bacias hidrográficas serão severamente impactadas por alterações nos regimes de precipitação, aumento da frequência de eventos extremos e redução da disponibilidade hídrica em diversas regiões do planeta” (Bates *et al.*, 2008, p. 112).

Tais mudanças exigem uma abordagem adaptativa na gestão das bacias, incorporando estratégias de mitigação, conservação e recuperação de ecossistemas críticos.

Portanto, o estudo das bacias hidrográficas transcende a dimensão puramente física, incorporando perspectivas ecológicas, sociais, políticas e tecnológicas. Essa abordagem sistêmica é fundamental para a sustentabilidade, pois permite integrar conservação ambiental, desenvolvimento econômico e justiça social em uma mesma unidade de planejamento.

2.7 GESTÃO DE RISCOS HIDROLÓGICOS

A gestão de riscos hidrológicos constitui um dos grandes desafios das cidades contemporâneas, especialmente no contexto de crescimento urbano acelerado e mudanças climáticas globais. O termo risco hidrológico refere-se à probabilidade de ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como inundações, alagamentos, enxurradas e secas, associados à magnitude de seus impactos sobre pessoas, bens e infraestrutura (Tucci, 2007). O conceito de risco, portanto, abrange tanto o perigo físico quanto a vulnerabilidade socioeconômica das populações expostas.

Segundo Tucci (2007):

[...] a gestão de riscos hidrológicos não se limita à execução de obras de engenharia, mas exige uma abordagem integrada que envolve políticas públicas, planejamento urbano, monitoramento ambiental, educação e participação social. Essa visão multidisciplinar amplia a compreensão do problema, deslocando o foco da resposta emergencial para estratégias preventivas e de adaptação (Tucci, 2007, p. 21).

Dessa forma, a metodologia proposta pelo autor ressalta que a gestão de riscos hidrológicos deve ir além da adoção de medidas estruturais, incorporando de maneira integrada as particularidades do território, as condições de exposição e vulnerabilidade da população e as formas de ocupação urbana. Nesse sentido, a identificação e a espacialização das áreas de risco constituem etapas importantes para subsidiar ações de planejamento e prevenção. No contexto deste estudo, essa perspectiva sustenta a utilização de variáveis físicas, socioeconômicas e de ocupação urbana na avaliação do risco de alagamentos e inundações na zona urbana consolidada de União-PI.

2.7.1 Etapas da Gestão de Riscos

“A literatura especializada identifica três dimensões fundamentais no enfrentamento de riscos hidrológicos: prevenção, mitigação e adaptação” (Tucci, 2008, p. 102).

- **Prevenção:** envolve o planejamento territorial e urbano, com o objetivo de evitar ocupações irregulares em áreas de risco, como várzeas, margens de rios e encostas instáveis. Essa etapa pressupõe o controle do uso do solo, de modo a reduzir a exposição da população a eventos extremos.
- **Mitigação:** consiste em medidas estruturais, como sistemas de drenagem, diques, reservatórios de retenção e canalizações, e não estruturais, como planos diretores de drenagem e programas educativos. Tucci (2007) ressalta que as soluções baseadas na natureza, como áreas de infiltração e corredores verdes, têm se mostrado alternativas eficazes para o controle do escoamento superficial.
- **Adaptação:** refere-se à capacidade de comunidades e cidades se reorganizarem diante de eventos extremos, desenvolvendo resiliência. Essa etapa inclui a implementação de sistemas de alerta precoce, planos de contingência e estratégias de convivência com eventos inevitáveis.

Braga, Porto e Tucci (2018) destacam que “a efetividade da gestão depende da combinação dessas três dimensões em políticas públicas consistentes, articuladas entre diferentes escalas e esferas de governo” (Braga, Porto e Tucci, 2018, p. 63).

2.7.2 Gestão Urbana e Ocupação do Solo

No contexto urbano, os problemas de drenagem não se explicam apenas pela intensidade das chuvas, mas pela forma como o território é ocupado. A impermeabilização do solo, o crescimento desordenado das cidades e a ocupação de áreas de risco ampliam a vulnerabilidade da população. Para Tucci (2008), “a gestão de riscos deve estar integrada ao ordenamento territorial, de modo que intervenções como galerias pluviais ou canais de escoamento sejam compreendidas dentro de uma estratégia de planejamento urbano mais ampla” (Tucci, 2008, p. 107).

A relação entre vulnerabilidade social e impactos hidrológicos também é

ressaltada por Souza (2013) ao argumentar que comunidades mais pobres são as mais afetadas por enchentes e alagamentos, não apenas pelos danos materiais, mas pela limitação de recursos para recuperação. Assim, políticas públicas devem priorizar áreas críticas, considerando fatores como densidade populacional, qualidade da infraestrutura e condições socioeconômicas.

2.7.3 Geotecnologias e Modelagem Hidrológica

Os avanços recentes em geotecnologias têm contribuído significativamente para a avaliação de riscos hidrológicos. “O uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e sensoriamento remoto permite integrar dados topográficos, pluviométricos, hidrológicos e socioeconômicos, possibilitando o mapeamento de áreas vulneráveis e a modelagem de cenários de inundação” (Braga; Porto; Tucci, 2018, p. 72).

[...] Modelos hidrológicos e hidráulicos também se consolidaram como ferramentas indispensáveis. O SWMM (Storm Water Management Model) e o HEC-RAS, por exemplo, permitem simular a resposta de sistemas urbanos a diferentes intensidades de chuva e ocupações do solo, avaliando a eficiência de obras de drenagem e o impacto de intervenções urbanísticas (Tucci, 2007, p. 212).

Além disso, a possibilidade de simular cenários climáticos futuros amplia a capacidade de planejamento e adaptação das cidades frente às mudanças climáticas.

2.7.4 Escala da Bacia Hidrográfica e Manejo Integrado

O conceito de bacia hidrográfica como unidade de análise é fundamental para compreender a interdependência dos processos hidrológicos. Christofolletti (1980) destaca “que intervenções localizadas em uma parte da bacia repercutem em toda a sua dinâmica, influenciando infiltração, escoamento e transporte de sedimentos” (Christofolletti, 1980, p. 35). Isso implica que a gestão urbana da drenagem não pode ser dissociada do manejo integrado de bacias hidrográficas.

Nesse sentido, Tucci (2008) argumenta que “a articulação entre drenagem urbana e manejo de bacias é essencial para reduzir a frequência e a intensidade de eventos extremos” (Tucci, 2008, p. 109). Medidas isoladas, restritas ao perímetro

urbano, tendem apenas a deslocar o problema para áreas a jusante, sem reduzir de fato o risco hidrológico.

2.7.5 Mudanças Climáticas e Resiliência

“O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) alerta que os eventos hidrológicos extremos tendem a se intensificar em decorrência do aquecimento global” (Bates *et al.*, 2008, p. 18). Nesse contexto, a resiliência urbana torna-se um eixo central da gestão de riscos. Planos de adaptação, sistemas de alerta precoce, planos de evacuação e infraestrutura resiliente são medidas que devem ser integradas ao planejamento urbano e às políticas de uso do solo.

Souza (2013), enfatiza que:

[...] a governança participativa, com envolvimento da sociedade civil e de comitês de bacias hidrográficas, fortalece a capacidade adaptativa das comunidades, pois amplia a consciência coletiva sobre os riscos e cria redes de cooperação para resposta a desastres (Souza, 2013, p. 67).

A gestão de riscos hidrológicos deve ser compreendida como um processo contínuo, integrado e multidisciplinar, que combina conhecimento técnico, planejamento estratégico, tecnologias de ponta e participação social. Para além da redução de danos humanos e materiais, esse processo constitui um elemento estruturante de cidades sustentáveis e resilientes.

No Brasil, os desafios são particularmente relevantes diante da urbanização acelerada, da ocupação irregular de áreas de risco e das vulnerabilidades sociais. Nesse cenário, o investimento em prevenção, mitigação e adaptação, aliado à integração entre drenagem urbana e manejo de bacias, representa não apenas uma estratégia de redução de riscos, mas também de promoção da qualidade de vida e de justiça socioambiental.

2.8 CONCEITOS DE RESILIÊNCIA E VULNERABILIDADE URBANA FRENTE A EVENTOS EXTREMOS

O aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos, associado às mudanças climáticas globais e à urbanização acelerada, tem evidenciado a necessidade de incorporar os conceitos de vulnerabilidade e resiliência urbana ao

planejamento e à gestão das cidades. Esses conceitos, interligados, são fundamentais para compreender como diferentes populações e territórios reagem a desastres naturais ou antrópicos e quais estratégias podem ser implementadas para reduzir impactos e promover maior segurança socioambiental.

Segundo Castro (2010), a vulnerabilidade pode ser entendida como a “probabilidade de uma comunidade ou área geográfica ser afetada por uma ameaça ou risco potencial de desastre, estabelecida a partir de estudos técnicos” (Castro, 2010, p. 57). Essa definição destaca a importância das análises técnicas e da identificação precisa das populações mais suscetíveis a impactos de enchentes, deslizamentos, tempestades e ondas de calor, entre outros eventos extremos.

2.8.1 Vulnerabilidade Urbana

Cardona (2001) amplia a definição de vulnerabilidade ao considerar não apenas o espaço físico, mas também as condições sociais, econômicas e políticas que determinam a suscetibilidade de comunidades a desastres. Dessa forma, a vulnerabilidade é resultado da interação entre fatores estruturais e conjunturais. Comunidades com infraestrutura precária, baixa renda ou acesso limitado a serviços públicos essenciais apresentam maior dificuldade de resposta e recuperação diante de eventos extremos.

Katzman *et al.* (1999) destacam que “a vulnerabilidade social integra aspectos culturais, institucionais e econômicos à análise, reconhecendo que o risco urbano envolve exposição, sensibilidade e capacidade de resposta” (Katzman *et al.*, 1999, p. 14). Wisner *et al.* (2004) reforçam que “a vulnerabilidade é uma construção social, moldada pela forma como a sociedade organiza seus territórios e distribui recursos” (Wisner *et al.*, 2004, p. 11). Assim, a ausência de planejamento territorial eficiente e a precariedade dos serviços básicos ampliam significativamente os impactos de desastres em contextos urbanos.

2.8.2 Resiliência Urbana

Enquanto a vulnerabilidade evidencia fragilidades, a resiliência se associa à capacidade de absorção, recuperação e adaptação frente a perturbações. Holling (1973), pioneiro no estudo da resiliência em sistemas ecológicos, definiu-a como “a

capacidade de um sistema retornar ao equilíbrio após uma perturbação, conceito posteriormente expandido para sistemas sociais e urbanos” (Holling, 1973, p. 7). No contexto das cidades, a resiliência urbana se refere à habilidade de manter funções essenciais: transporte, saúde, energia, abastecimento de água, saneamento, segurança; mesmo diante de choques. Pelling (2003) destaca que cidades resilientes não apenas resistem aos impactos, mas aprendem com eles e se reorganizam de forma a reduzir vulnerabilidades futuras. Adger (2000) aponta que a resiliência urbana depende da coesão social, da governança participativa e da capacidade institucional de planejar e implementar medidas de mitigação e adaptação, demonstrando que fatores sociais e institucionais são tão importantes quanto a infraestrutura física.

2.8.3 Inter-Relação entre Vulnerabilidade e Resiliência

Birkmann (2006) ressalta que:

[...] compreender a vulnerabilidade sem considerar a resiliência gera diagnósticos incompletos, enquanto avaliar a resiliência sem levar em conta as condições estruturais da vulnerabilidade resulta em estratégias superficiais. Portanto, políticas públicas eficazes devem articular esses dois enfoques, unindo diagnóstico e ação (Birkmann, 2006, p. 12).

Fatores como ocupação irregular, densidade populacional elevada, infraestrutura inadequada e precariedade de serviços básicos aumentam a vulnerabilidade urbana. Cardona (2001) ressalta que “o risco de desastre está diretamente relacionado ao grau de exclusão social e à desigualdade econômica” (Cardona, 2001, p. 67), enquanto Wisner *et al.* (2004) acrescentam que “estruturas de poder e tomada de decisão influenciam fortemente quem sofre os impactos, deixando populações marginalizadas mais expostas a desastres” (Wisner *et al.*, 2004, p. 36).

2.8.4 Construção Da Resiliência Urbana

A resiliência urbana exige abordagem sistêmica, envolvendo aspectos físicos, sociais, econômicos e institucionais. Medidas como planejamento adaptativo, sistemas de alerta precoce, planos de evacuação, infraestrutura resiliente e

educação comunitária fortalecem a capacidade de absorção e resposta das cidades. Pelling (2003) enfatiza que a construção de resiliência depende de políticas inclusivas que envolvam a sociedade civil, enquanto Cutter *et al.* (2003) propõem indicadores de vulnerabilidade e resiliência que consideram exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa, permitindo comparações entre diferentes regiões.

As geotecnologias têm papel crescente no estudo da vulnerabilidade e da resiliência urbanas. Mendes; Cunha e Rodrigues (2018) destacam que “o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e análise multicritério possibilita mapear áreas críticas e subsidiar políticas públicas de adaptação” (Mendes; Cunha e Rodrigues, 2018, p. 3). Essa abordagem integra variáveis físicas, sociais e econômicas, permitindo diagnósticos mais precisos e direcionando investimentos de forma eficiente.

A literatura evidencia que a integração entre vulnerabilidade e resiliência é essencial para a construção de cidades mais seguras, adaptáveis e capazes de enfrentar os desafios impostos pelos eventos extremos. A articulação entre infraestrutura, governança, participação social, políticas públicas e tecnologias de monitoramento constitui a base para um planejamento urbano mais eficiente e sustentável.

2.9 FUNDAMENTOS DO GEOPROCESSAMENTO E SUA APLICAÇÃO NO ESTUDO DE RISCOS

O geoprocessamento é uma área estratégica do conhecimento, voltada para a aquisição, armazenamento, processamento, análise e representação de informações georreferenciadas. Essa abordagem permite compreender a organização espacial de fenômenos naturais e humanos, integrando dados geográficos de diversas fontes em sistemas de informações geográficas (SIG), com o objetivo de fornecer análises detalhadas e fundamentadas para o planejamento e gestão territorial (Fonseca, 2002).

No estudo de riscos, especialmente os hidrológicos, o geoprocessamento tem se consolidado como uma ferramenta essencial para a identificação e monitoramento de áreas vulneráveis. Ele possibilita a análise integrada de fatores físicos e socioeconômicos, permitindo mapear áreas sob risco, avaliar suas causas e subsidiar decisões estratégicas de prevenção e mitigação (Negreiros, 2003). Essa

abordagem permite analisar simultaneamente fatores como topografia, drenagem, uso do solo, cobertura vegetal, ocupação urbana e infraestrutura crítica.

As ferramentas de geotecnologia mais empregadas incluem imagens digitais de satélites multitemporais, de resolução moderada a alta, imagens aerofotogramétricas obtidas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) e dados de geoposicionamento obtidos via Global Navigation Satellite System (GNSS) (Costa *et al.*, 2016). Essas tecnologias possibilitam a coleta de dados precisos e detalhados, sendo essenciais para a construção de mapas temáticos de vulnerabilidade e risco, capazes de orientar políticas públicas e investimentos em infraestrutura urbana.

Magalhães *et al.* (2011) ressaltam que o geoprocessamento auxilia na avaliação integrada das causas de inundações, alagamentos e enchentes, permitindo identificar áreas com maior probabilidade de ocorrência e compreender os fatores que potencializam o risco. A integração de múltiplas camadas de informação espacial, por meio de SIG, permite estabelecer relações complexas entre fatores naturais e antrópicos, como a influência da impermeabilização do solo na redução da infiltração e o impacto de áreas urbanizadas em sistemas de drenagem.

Uma das aplicações mais relevantes do geoprocessamento é a análise multicritério espacial, que combina diferentes critérios ponderados para gerar mapas de risco precisos. Essa abordagem permite avaliar múltiplos fatores simultaneamente, como declividade do terreno, intensidade pluviométrica, densidade populacional e cobertura vegetal, produzindo mapas de vulnerabilidade que são instrumentos estratégicos para o planejamento urbano e para a priorização de ações preventivas (Câmara *et al.*, 2000).

O sensoriamento remoto também desempenha papel central na análise de riscos urbanos. Imagens de satélite multitemporais permitem monitorar mudanças na ocupação do solo, degradação ambiental e surgimento de áreas de risco emergentes. Tais informações podem ser integradas a SIG para identificar padrões de vulnerabilidade e apoiar a tomada de decisão de gestores urbanos, permitindo intervenções mais rápidas e assertivas (Lillesand *et al.*, 2015).

Além disso, o geoprocessamento facilita a integração de dados socioeconômicos e ambientais, essencial para avaliar a vulnerabilidade das comunidades. Mapas que combinam informações sobre população, infraestrutura urbana e exposição a desastres possibilitam identificar grupos sociais mais vulneráveis e subsidiar políticas públicas mais equitativas. Essa abordagem amplia a

compreensão sobre a interação entre fenômenos naturais e impactos socioeconômicos, promovendo ações preventivas direcionadas (Cutter *et al.*, 2003).

Outro avanço recente, de acordo com Costa *et al.* (2016) é o monitoramento contínuo de áreas de risco, que combina sensores remotos, imagens de satélite e dados geoespaciais para acompanhar alterações no território em tempo quase real. Essa integração permite detectar alterações de uso do solo e identificar zonas suscetíveis a alagamentos, fornecendo informações para planejamento urbano adaptativo e gestão de emergências. A capacidade de atualizar mapas e indicadores em intervalos curtos aumenta a eficiência das ações preventivas e reduz impactos em populações vulneráveis.

A utilização de tecnologias emergentes, como drones para fotogrametria, LiDAR e sensoriamento remoto de alta resolução, tem ampliado a precisão e o detalhamento das análises geoespaciais. Esses avanços permitem identificar microzonas de risco e integrar informações ambientais e urbanas de maneira dinâmica, contribuindo para a construção de cidades mais resilientes frente a eventos extremos.

Portanto, os fundamentos do geoprocessamento, aliados ao sensoriamento remoto, análise multicritério e integração de dados socioambientais, configuram-se como instrumentos indispensáveis para o estudo de riscos hidrológicos. Eles possibilitam compreender a complexidade do território, identificar áreas críticas, avaliar vulnerabilidades e subsidiar políticas públicas, fortalecendo a capacidade de prevenção, mitigação e adaptação das cidades diante de eventos extremos.

2.10 ANÁLISE MULTICRITÉRIO COMO FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO INTEGRADA DE FATORES DE RISCO

A análise multicritério (AMC) é reconhecida como uma das metodologias mais eficazes para a avaliação integrada de fatores de risco, principalmente em estudos que envolvem geoprocessamento e gestão de desastres naturais. Essa metodologia permite combinar diferentes variáveis espaciais e não espaciais, ponderar sua importância relativa e gerar produtos cartográficos que apoiam a tomada de decisão. Como afirmam Almeida e Costa (2003), “a AMC, quando associada ao geoprocessamento, constitui um recurso essencial para representar a realidade territorial e fundamentar diagnósticos sobre vulnerabilidades” (Almeida e

Costa, 2003, p. 41).

Segundo Moura (2007), a “análise multicritério possibilita realizar avaliações espaciais considerando múltiplas variáveis, respeitando critérios temporais e ambientais específicos” (Moura, 2007, p. 87). Essa capacidade torna a metodologia especialmente relevante em estudos de riscos hidrológicos, visto que a ocorrência de eventos extremos depende da interação entre fatores físicos, como topografia e drenagem, fatores ambientais, como cobertura e uso do solo, e fatores sociais, como densidade populacional e vulnerabilidade socioeconômica. A síntese dessas variáveis em um único produto cartográfico amplia a compreensão sobre as condições de risco e torna a prevenção mais eficiente.

O procedimento metodológico da AMC baseia-se no cruzamento de variáveis espaciais e é frequentemente operacionalizado por técnicas como a Análise Hierárquica de Pesos (AHP), proposta por Saaty (1980). Nesse processo, cada variável é mapeada e recebe um peso ou nota proporcional ao seu grau de relevância em relação ao fenômeno analisado. O resultado final deriva da combinação dessas variáveis ponderadas, geralmente por meio de médias ponderadas ou matrizes de comparação par a par. De acordo com Malczewski (1999), “a AHP se destaca por permitir a integração sistemática de critérios objetivos e subjetivos, garantindo maior rigor no processo de tomada de decisão espacial” (Malczewski, 1999, p. 11). Além disso, “métodos baseados em lógica fuzzy têm sido empregados para lidar com a incerteza associada às atribuições de pesos, trazendo maior flexibilidade às análises” (Moura, 2007, p. 93).

A grande contribuição da AMC é sintetizar informações complexas e heterogêneas em representações claras e interpretáveis, como mapas de risco. Esses produtos cartográficos facilitam a identificação de áreas mais suscetíveis a inundações, deslizamentos ou alagamentos, subsidiando tanto a gestão de emergências quanto o planejamento urbano. Silva, *et al.* (2009) demonstram que:

[...] a aplicação da análise multicritério em SIG permitiu identificar zonas críticas de risco em ambientes urbanos, revelando padrões espaciais que dificilmente seriam reconhecidos apenas pela análise isolada de variáveis (Silva, *et al.* 2009, p. 106).

Estudos recentes exemplificam a aplicação prática dessa metodologia em diferentes contextos. Saputra *et al.* (2023) aplicaram “índices espectrais associados a variáveis geoambientais para mapear classes de risco de inundação na região de

Barito Kuala, na Indonésia” (Saputra *et al.*, 2023, p. 7), demonstrando a robustez da AMC quando associada ao sensoriamento remoto. Em outro estudo, Sharif *et al.* (2023) utilizaram “dados de radar provenientes do satélite Sentinel-1 para gerar modelos tridimensionais e mapear áreas urbanas sujeitas a inundações” (Sharif *et al.*, 2023, p. 4), reforçando a capacidade de integração entre AMC e produtos de alta resolução. Da mesma forma, Wienhold *et al.* (2023) empregaram “drones para coleta de imagens de alta resolução em áreas urbanas de pequeno porte nos Estados Unidos” (Wienhold *et al.*, 2023, p. 9), mostrando como os dados obtidos por VANT podem complementar a análise multicritério e fornecer diagnósticos detalhados sobre vulnerabilidade urbana.

Além da aplicação em estudos de caso, a AMC contribui para a gestão sistemática de informações geoespaciais. Segundo Câmara, Monteiro e Bertolucci (2000):

[...] o ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é o suporte ideal para estruturar, manipular e integrar as camadas de informação utilizadas na análise multicritério. A união entre AMC e SIG viabiliza a avaliação de fatores naturais e sociais em conjunto, considerando tanto a exposição física do território a eventos extremos quanto a vulnerabilidade socioeconômica das populações atingidas (Câmara, Monteiro e Bertolucci, 2000, p. 132).

Outro aspecto relevante é a adaptabilidade da análise multicritério. Ela pode ser aplicada a contextos distintos, de áreas urbanas densamente ocupadas a bacias hidrográficas rurais. Por sua flexibilidade, a metodologia pode ser utilizada para delimitar zonas de risco, definir prioridades de intervenção ou até mesmo projetar cenários futuros de vulnerabilidade em função das mudanças climáticas e da expansão urbana. Malczewski (2006) reforça que “a AMC é particularmente útil em situações que exigem a consideração simultânea de múltiplos critérios conflitantes, o que é comum em estudos de gestão ambiental e territorial” (Malczewski, 2006, p. 706).

Do ponto de vista prático, a AMC tem se consolidado como uma ferramenta indispensável para o planejamento e a gestão de riscos hidrológicos. Sua integração com geotecnologias, sensoriamento remoto e bases de dados socioeconômicas amplia o alcance das análises e fortalece a fundamentação técnica das decisões públicas. Como destaca Moura (2007), esse processo decisório ganha em transparência e legitimidade quando fundamentado em critérios claros e representações espaciais objetivas, o que aumenta a eficácia das políticas

preventivas.

Acredita-se, desta forma, que a análise multicritério representa uma abordagem metodológica capaz de transformar grandes volumes de informações dispersas em diagnósticos precisos e replicáveis. Ao integrar dados físicos, ambientais e sociais, promove uma avaliação holística dos riscos e contribui para o desenvolvimento de estratégias preventivas mais eficazes. A crescente disponibilidade de dados de alta resolução, associada à evolução das técnicas multicritério, abre perspectivas inovadoras para o estudo da vulnerabilidade e risco em diferentes escalas, fortalecendo a capacidade adaptativa das cidades diante de eventos extremos.

2.11 O PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA (AHP): FUNDAMENTOS, ESCALA DE SAATY, APLICAÇÕES E LIMITES

2.11.1 Origem e princípios do método

O *Analytic Hierarchy Process*, traduzido na literatura brasileira como Processo de Análise Hierárquica, foi sistematizado por Thomas L. Saaty na obra *The Analytic Hierarchy Process*, publicada em 1980 (Saaty, 1980), a partir de problemas práticos de alocação de recursos com os quais o autor trabalhou ao longo da década de 1970. O método nasceu da necessidade de formalizar matematicamente decisões que envolvem critérios de natureza qualitativa e quantitativa ao mesmo tempo, problema recorrente em planejamento territorial e em avaliação de risco, no qual o julgamento humano, ainda que subjetivo, é parte inevitável do processo.

O princípio central do método é a decomposição: um problema complexo, de difícil apreensão direta, é fragmentado em elementos mais simples, organizados em níveis hierárquicos, do objetivo geral no topo até os critérios que o compõem na base, de modo que comparações sejam feitas par a par, entre dois elementos de cada vez. Saaty (1980) sustenta que essa é a forma como o raciocínio humano lida, de modo natural, com problemas complexos, comparando pares em vez de ordenar diretamente conjuntos inteiros de variáveis heterogêneas.

No Brasil, a apropriação do método por pesquisadores da área de recursos hídricos consolidou-se sobretudo a partir dos anos 2010, período em que

dissertações e artigos de programas de pós-graduação em geografia, engenharia civil e recursos hídricos passaram a adotar a AHP como alternativa viável de mapeamento em municípios sem estação fluviométrica ou sem histórico sistematizado de cheias, situação comum à maior parte das cidades médias do país, entre elas União.

2.11.2 Estrutura hierárquica, matriz de comparação paritária e aplicação a critérios espacialmente distribuídos

A aplicação do AHP pressupõe, em um primeiro momento, a estruturação do problema de decisão em uma hierarquia em que o objetivo geral ocupa o nível superior, e os critérios que contribuem para esse objetivo ocupam o nível intermediário. Definida a hierarquia, o decisor realiza comparações par a par entre todos os elementos de um mesmo nível. Essas comparações são registradas numa matriz quadrada recíproca, na qual o elemento da linha i e coluna j expressa a importância relativa do critério i sobre o critério j , enquanto o elemento correspondente na posição espelhada recebe automaticamente o valor recíproco, e a diagonal principal, que compara cada critério consigo mesmo, recebe sempre o valor 1 (Saaty, 1980). Uma matriz de ordem n exige, portanto, apenas $n(n-1)/2$ julgamentos independentes, e não n^2 comparações completas.

Quando os critérios comparados não são alternativas discretas, mas planos de informação que cobrem todo um território, cada célula de um raster precisa ser tratada, ao final, como se fosse uma pequena decisão independente. Santos e Ventorini (2022) sistematizam exatamente essa adaptação ao aplicar a análise multicriterial de decisão fundamentada na AHP sobre a bacia do córrego do Lenheiro, em São João del-Rei, Minas Gerais. Nesse procedimento os autores tratam cada critério físico, como uso da terra, declividade e sistema de drenagem, como um plano de informação espacial independente, reclassificado em uma escala comum e depois combinado por álgebra de mapas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica, e não como um atributo isolado de uma alternativa discreta. É essa mesma lógica que permite que o método seja aplicado, nesta pesquisa, a cada uma das centenas de milhares de células que compõem a área urbana de União.

2.11.3 Escala fundamental de Saaty

Para converter julgamentos qualitativos (“um critério é mais importante do que outro”), em valores numéricos comparáveis, Saaty (1980) propôs uma escala de razão que varia de 1 a 9, hoje conhecida como Escala Fundamental de Saaty (Quadro 1). O valor 1 representa igual importância entre dois critérios; o valor 9, o grau mais extremo de importância de um critério sobre outro; os valores pares funcionam como graus intermediários, usados quando o julgamento não se encaixa perfeitamente em nenhum dos graus ímpares, conforme o Quadro 1 – Escala Fundamental de Saaty.

Quadro 1 – Escala Fundamental de Saaty

Intensidade	Definição	Explicação
1	Importância igual	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é fortemente favorecida em relação à outra; sua dominância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre dois julgamentos sucessivos.

Fonte: Adaptado de Saaty (1980).

A escala não sofreu adaptação relevante nas mais de quatro décadas em que passou a ser aplicada fora dos Estados Unidos. Gossler (2023), ao mapear a suscetibilidade a inundação na bacia do rio Rolante, no Rio Grande do Sul, reproduz a mesma tabela de forma integral, sem alterar seus nove níveis de intensidade, prática também observada nas demais dissertações brasileiras que aplicam o método a bacias urbanas. Isso sustenta a decisão, adotada nesta pesquisa, de

manter a escala original em vez de propor uma adaptação regional sem precedente na literatura consultada.

2.11.4 Derivação dos pesos e verificação da consistência

Para extrair da matriz de comparação paritária um vetor de pesos, ou prioridades, que expresse a importância relativa de cada critério, Saaty (1980) propõe originalmente o método do autovetor principal, no qual o vetor de prioridades corresponde ao autovetor associado ao maior autovalor ($\lambda_{\text{máx}}$) da matriz. Uma alternativa amplamente aceita na literatura, e adotada neste trabalho, é o método da média geométrica das linhas, que aproxima os pesos calculando a média geométrica dos valores de cada linha da matriz e, em seguida, normalizando esses valores para que sua soma seja igual a 1, preferível quando o cálculo é realizado sem apoio de software estatístico dedicado.

Como o julgamento humano raramente é perfeitamente transitivo, o AHP incorpora, desde sua formulação original, um mecanismo de verificação da consistência dos julgamentos. Calcula-se, primeiro, o maior autovalor da matriz ($\lambda_{\text{máx}}$); em seguida, o Índice de Consistência (IC), pela expressão $IC = (\lambda_{\text{máx}} - n) / (n - 1)$, em que n é a ordem da matriz. Esse índice é então comparado a um Índice Aleatório (IR), tabelado por Saaty (1980) a partir da simulação de milhares de matrizes recíprocas preenchidas aleatoriamente, como pode ser visto na Tabela 1 – Índice Aleatório (IR) por ordem de matriz, resultando na Razão de Consistência ($RC = IC / IR$), aceita quando igual ou inferior a 0,10.

Tabela 1 – Índice Aleatório (IR) por ordem de matriz

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Adaptado de Saaty (1980).

O limiar de 0,10 é seguido com regularidade na produção brasileira sobre o tema. Lima (2025), ao integrar AHP e HAND no mapeamento de áreas suscetíveis a inundação no perímetro urbano de Jequié, na Bahia, com nove fatores topográficos e hidrológicos, reporta razão de consistência de 0,081, valor que o autor discute explicitamente como evidência de que a matriz de julgamento adotada é

internamente coerente. Esse tipo de relato, com a razão registrada em três casas decimais e comparada de forma explícita ao limite de 10%, segue o mesmo padrão adotado na aplicação do método a cada um dos componentes desta pesquisa.

2.11.5 Aplicações do AHP em risco de inundação no Brasil, precedentes internacionais e limites do método

A escolha da AHP em vez de uma modelagem hidrológico-hidrodinâmica não é uma decisão isolada, e a literatura brasileira recente oferece uma base de comparação direta entre os dois caminhos. Gossler (2023), em dissertação de mestrado profissional voltada à gestão de recursos hídricos, avalia modelos hidrodinâmicos como o HAND, aplicado no Brasil pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais para capturar a relação topográfica entre terreno e água, e o Modelo de Grandes Bacias, desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para simular escoamento a partir de dados meteorológicos contínuos (Collischonn; Tucci, 2001; Alves *et al.*, 2020).

Ambos os modelos, como o próprio autor demonstra, dependem de séries históricas de dados meteorológicos e hidrológicos que a maior parte dos municípios brasileiros de porte médio simplesmente não possui, situação que se repete em União. A AHP contorna essa limitação ao substituir a exigência de dados contínuos de vazão por julgamento estruturado sobre variáveis físicas e socioeconômicas mais facilmente obtidas em bases públicas, como modelos digitais de elevação, imagens de satélite e dados censitários.

Essa é, hoje, uma das trajetórias metodológicas mais recorrentes no mapeamento de suscetibilidade e risco de inundação em cidades brasileiras de porte médio, presente em bacias urbanas de praticamente todas as regiões do país, conforme exemplifica o Quadro 2 – Precedentes brasileiros da aplicação do AHP em suscetibilidade e risco de inundação.

Quadro 2 – Precedentes brasileiros da aplicação do AHP em suscetibilidade e risco de inundação

Autoria e ano	Área de estudo	CrITÉrios ponderados por AHP	Produto gerado
Campioli e Vieira (2019)	Bacia do rio Cubatão do Norte, Joinville, Santa Catarina	Hipsometria, declividade, uso do solo, pedologia, geologia, zoneamento municipal	Mapa de risco de inundação
Mantovani (2016)	Bacia do córrego Indaiá, Aquidauana, Mato Grosso do Sul	Geologia, geomorfologia, pedologia, uso do solo, declividade, hipsometria	Mapa de suscetibilidade, área sem registro histórico de inundação
Gossler (2023)	Bacia do rio Rolante, Rolante, Rio Grande do Sul	Declividade, altitude, uso e ocupação do solo, proximidade do recurso hídrico, tipo de solo	Mapa de suscetibilidade, dissertação de mestrado profissional (ProfÁgua)
Lima (2025)	Perímetro urbano de Jequié, Bahia	9 critérios topográficos, hidrológicos e de uso do solo (AHP integrado a HAND)	Mapa de suscetibilidade, RC = 0,081
Conceição (2023)	Área urbana de Maceió, Alagoas	CrITÉrios e subcrITÉrios físicos ponderados por AHP	Mapa de suscetibilidade, validado com registros fotográficos do início da quadra chuvosa
Silva <i>et al.</i> (2026)	São João de Meriti, Rio de Janeiro	Altitude, declividade, hidrografia, uso do solo	Mapa de suscetibilidade, validado por registros de ocorrência

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Estes seis trabalhos reunidos, cobrem bacias urbanas do Sul, Centro-Oeste, Nordeste e Sudeste do país, produzidos entre 2016 e 2026, o que indica que a combinação entre AHP e geoprocessamento não é uma escolha isolada desta pesquisa, mas uma trajetória já consolidada na produção acadêmica brasileira sobre risco hidrológico urbano. A mesma combinação de método aparece também na literatura internacional, com aplicações recentes na Grécia (Kazakis; Kougias;

Patsialis, 2015) e no Pará (Oliveira, 2025), o que reforça que se trata de um caminho metodológico validado em contextos variados, e não de uma escolha idiossincrática desta pesquisa.

A tradição brasileira de índices compostos para risco de inundação, no entanto, antecede essa onda mais recente de trabalhos baseados em comparação pareada de Saaty. Zonensein (2007) propôs um Índice de Risco de Cheia construído como soma ponderada de indicadores normalizados relativos às características da inundação, à população exposta e ao uso e ocupação do solo, com pesos fixados a priori pelo autor, sem recorrer à comparação par a par.

Entre as limitações do método, a mais discutida na literatura internacional é sua natureza compensatória. Belton e Stewart (2002) classificam a AHP entre os métodos de agregação em valor único, que somam contribuições ponderadas de critérios distintos em um único índice, permitindo que um valor baixo em um critério seja compensado por um valor alto em outro; Munda (2004), em crítica dirigida a essa família de métodos, argumenta que essa compensabilidade pode obscurecer situações em que um critério isoladamente crítico deveria, por si só, elevar o alerta.

Costa (2006 apud Conceição, 2023) reconhece a mesma limitação ao descrever a AHP como um método vocacionado à hierarquização de prioridades, e não à identificação isolada de fatores críticos. Essa ressalva tem consequência direta para a leitura dos resultados desta pesquisa, pois um setor censitário com Suscetibilidade física apenas moderada, mas Vulnerabilidade socioeconômica elevada, pode alcançar índice de risco final comparável ao de um setor com Suscetibilidade elevada e Vulnerabilidade baixa, o que é adequado ao objetivo de hierarquizar prioridades de intervenção, mas exige que o índice produzido seja interpretado como ordenação relativa de suscetibilidade, e não como medida absoluta de segurança.

2.12 ÁLGEBRA DE MAPAS E COMBINAÇÃO LINEAR PONDERADA

2.12.1 Fundamentos da álgebra de mapas

A expressão álgebra de mapas designa o conjunto de operações matemáticas aplicáveis a dados espaciais organizados em formato raster, no qual o espaço geográfico é representado por uma grade regular de células, cada uma

armazenando um valor numérico referente a determinada variável (Tomlin, 1990). Ainda segundo Tomlin (1990) operações de álgebra de mapas são classificadas em três categorias: operações locais, nas quais o valor de saída de cada célula depende exclusivamente dos valores de entrada daquela mesma célula, em um ou mais planos de informação sobrepostos; operações focais, nas quais o valor de saída depende também dos valores das células vizinhas; e operações zonais, nas quais o valor de saída é calculado a partir de todas as células pertencentes a uma mesma zona. A combinação ponderada de múltiplos critérios em um único índice de suscetibilidade, procedimento central da metodologia empregada neste trabalho, enquadra-se na categoria das operações locais.

A aplicação dessa lógica a bacias urbanas brasileiras tem precedente direto e recente. Santos e Ventorini (2022) aplicam a álgebra de mapas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica combinada à AHP na bacia do córrego do Lenheiro, em Minas Gerais, com cada critério físico reclassificado em uma mesma escala de suscetibilidade antes de ser sobreposto. Cruz *et al.* (2013 apud Gossler, 2023), em um exercício de avaliação ambiental integrada da bacia do Alto e Médio Uruguai, organizam a fragilidade do território a partir de três blocos de critérios (meio físico, biótico e antrópico), sobrepostos em SIG com pesos definidos por grupo de trabalho, demonstrando que a lógica de sobreposição ponderada de planos de informação já é prática estabelecida na avaliação ambiental brasileira antes mesmo de sua combinação com a AHP.

2.12.2 Combinação Linear Ponderada como técnica de agregação multicritério em SIG

Entre as técnicas de agregação disponíveis dentro da álgebra de mapas, a Combinação Linear Ponderada é, segundo Malczewski (2000), a mais empregada em análises multicritério espaciais, por sua simplicidade conceitual e computacional. A técnica consiste em multiplicar o valor de cada célula, em cada plano de informação, pelo peso atribuído ao respectivo critério, e somar os produtos resultantes célula a célula. A adequação da técnica pressupõe que os critérios estejam previamente padronizados em uma escala comum, de modo que a soma ponderada seja aritmeticamente válida entre grandezas originalmente heterogêneas, como metros de distância, porcentagem de declividade e número de domicílios por

hectare (Malczewski, 1999). É por essa razão que, na metodologia deste trabalho, cada um dos doze critérios foi previamente reclassificado em uma escala comum de suscetibilidade, de 1 a 5.

A técnica também pressupõe compensabilidade entre critérios, ou seja, um valor baixo em um critério pode ser compensado por um valor alto em outro, o que a distingue de métodos não compensatórios (Malczewski, 1999), limitação já discutida a propósito da própria AHP. A opção por essa combinação, e não por métodos bayesianos que exigiriam um inventário histórico robusto e georreferenciado de eventos de alagamento em União, indisponível na etapa atual da pesquisa, segue a mesma justificativa prática adotada por Gossler (2023) e por Lima (2025) em municípios brasileiros igualmente carentes de séries hidrológicas contínuas: diante da escassez de dados, a combinação linear ponderada permite produzir um mapeamento confiável a partir de bases públicas amplamente disponíveis, sem depender de monitoramento fluviométrico local.

2.13 RISCO COMO FUNÇÃO DE SUSCETIBILIDADE, EXPOSIÇÃO E VULNERABILIDADE

2.13.1 A decomposição do risco na literatura de gestão de desastres

A literatura brasileira de gestão de risco de desastres já opera, há pelo menos duas décadas, com a premissa de que um evento hidrológico extremo só se converte em desastre quando encontra uma população e um território vulneráveis a seus efeitos. O Escritório das Nações Unidas para Redução do Risco de Desastres, define desastre como a interrupção do funcionamento de uma comunidade decorrente de eventos perigosos que interagem com condições de exposição, vulnerabilidade e capacidade de resposta (UNDRR, 2017 apud Conceição, 2023). É essa mesma premissa que orienta a produção brasileira recente sobre inundação e alagamento em área urbana, onde o dano observado em um evento hidrológico não decorre apenas da magnitude física da chuva ou da cheia, mas do modo como esse evento encontra um território e uma população despreparados para absorvê-lo.

Essa mesma lógica de decomposição foi formalizada, de modo independente, em outras tradições internacionais. Crichton (1999), a partir da prática de subscrição de seguros no Reino Unido, propôs o chamado triângulo de risco, no qual o risco

resulta da combinação entre suscetibilidade (a probabilidade de ocorrência de um evento de determinada magnitude), exposição (os elementos sujeitos ao impacto desse evento), e vulnerabilidade (o grau em que esses elementos tendem a sofrer perda diante do impacto), com a propriedade de que o risco é nulo se qualquer um dos três lados do triângulo tiver comprimento zero.

Blaikie, Cannon, Davis e Wisner (1994) chegaram a conclusão estruturalmente próxima por caminho independente, ao propor o modelo de Pressão e Alívio, segundo o qual um desastre ocorre no encontro entre um evento físico perigoso e uma progressão de vulnerabilidade que se origina em causas econômicas e políticas profundas. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas consolidou essa convergência ao definir formalmente o risco de desastres associados a eventos climáticos extremos como resultado da interação entre suscetibilidade, Exposição e Vulnerabilidade (IPCC, 2012), na mesma linha da gestão integral do risco descrita por Cardona (2001) como articulação entre ameaça física e condições de vulnerabilidade.

Essa decomposição em três componentes distintos, e não em um único indicador combinado desde o início, tem uma justificativa analítica precisa, onde fenômenos de igual magnitude física produzem consequências completamente diferentes a depender do que está exposto ao seu alcance e de quão vulnerável esse elemento exposto se encontra. Um mesmo evento de alagamento pode representar transtorno moderado em uma área de baixa densidade populacional e alta renda, com capacidade de resposta e recuperação rápidas, e representar perda substancial em uma área de alta densidade populacional e baixa renda, na qual a mesma lâmina d'água interrompe atividades econômicas, danifica moradias precárias e atinge uma população com menor capacidade de recuperação.

A estrutura metodológica adotada nesta pesquisa replica essa decomposição. O componente Suscetibilidade reúne os critérios físicos e hidrológicos que determinam a suscetibilidade do terreno ao acúmulo ou ao escoamento de água. O componente Exposição reúne os critérios que expressam a presença de população, edificações e equipamentos urbanos sensíveis nas áreas fisicamente suscetíveis. O componente Vulnerabilidade reúne os critérios socioeconômicos que expressam a fragilidade e a capacidade de resposta da população exposta. A integração final desses três componentes, por meio de uma matriz de julgamento paritário aplicada ao método já descrito neste referencial, gera o índice de risco que estrutura a carta

de risco produzida por este trabalho.

A operacionalização de um componente de vulnerabilidade a partir de variáveis censitárias, como renda, faixa etária e escolaridade, tem precedente direto na literatura brasileira sobre risco de inundação em setor censitário. Ferreira (2019), no mapeamento do grau de risco de inundação em Natal, no Rio Grande do Norte, adota um Índice de Vulnerabilidade a Inundação proposto por Brito (2017) que constrói a vulnerabilidade social de cada setor a partir da combinação de população total, população em faixas etárias de zero a quatro anos e acima de sessenta anos, população analfabeta, renda per capita e concentração de elementos urbanos essenciais, quase as mesmas variáveis que compõem o componente Vulnerabilidade desta pesquisa.

A diferença metodológica relevante é que aquele índice atribui os pesos a essas variáveis diretamente, por classificação em faixas percentuais, ao passo que esta pesquisa obtém os pesos por julgamento estruturado via AHP. A arquitetura conceitual de fundo, porém, é a mesma, decompor a vulnerabilidade social em variáveis demográficas e socioeconômicas mensuráveis por setor censitário e recombiná-las em um índice único. Cutter *et al.* (2003), nos Estados Unidos, chegaram a uma estrutura semelhante por meio de análise fatorial sobre variáveis equivalentes, o que mostra que essa mesma arquitetura conceitual aparece de forma recorrente tanto na literatura brasileira quanto na internacional.

Manter os três componentes separados até a etapa final de integração, em vez de somar diretamente os doze critérios em um único índice desde o início, preserva a possibilidade de identificar, a posteriori, qual componente predomina na formação do risco em cada ponto do território. Dessa forma, medidas poderiam ser tomadas, como por exemplo: áreas em que o risco decorre principalmente do componente Suscetibilidade demandam intervenções físicas, como obras de drenagem; áreas em que o risco decorre principalmente da Vulnerabilidade demandam políticas sociais direcionadas, ainda que a suscetibilidade física do terreno seja apenas moderada.

2.14 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DOS CRITÉRIOS DE SUSCETIBILIDADE, EXPOSIÇÃO E VULNERABILIDADE

2.14.1 Fundamentos dos critérios do componente Suscetibilidade

Os critérios físicos que compõem o componente Suscetibilidade derivam de princípios consolidados da hidrologia de encostas, da geomorfologia fluvial e da hidrologia urbana, com forte tradição de aplicação no território brasileiro. A relação entre cota altimétrica e acúmulo de água associa-se à análise da fragilidade ambiental proposta por Ross (1994 apud Santos, 2025), cuja classificação de declividade e de unidades de fragilidade é, uma das mais amplamente adotadas em análises ambientais no Brasil.

Mantovani (2016) e Campioli e Vieira (2019 apud Gossler, 2023) empregam exatamente essa lógica hipsométrica, ao lado da declividade, entre os critérios ponderados por AHP em suas respectivas bacias urbanas, onde bacias com maior proporção de área em cotas baixas tendem a concentrar e reter volumes maiores de escoamento proveniente das áreas circundantes, relação descrita originalmente para bacias norte-americanas por Strahler (1952) e hoje incorporada de forma rotineira à leitura de modelos digitais de elevação em ambiente de geoprocessamento.

A declividade, por sua vez, governa não a direção, mas a velocidade desse escoamento, conforme o conceito de escoamento superficial por excesso de infiltração formulado por Horton (1933), no qual a velocidade com que a água se desloca sobre a superfície do terreno cresce com o aumento da declividade, reduzindo o tempo de contato entre a água precipitada e o solo e, conseqüentemente, a fração da precipitação que consegue infiltrar antes de escoar.

Terrenos planos, ao contrário, retardam esse escoamento e favorecem tanto a infiltração quanto o acúmulo superficial, o que explica por que a suscetibilidade máxima, nos critérios deste trabalho, é atribuída às classes de menor declividade, na mesma direção seguida por Ross (1994 apud SANTOS, 2025) ao classificar como mais frágeis as unidades de relevo mais suaves e sujeitas a acúmulo.

Os critérios de proximidade, à drenagem secundária e ao Rio Parnaíba, expressam mecanismos de acúmulo distintos entre si, ainda que relacionados, pois quanto mais próximo um ponto do território está de um canal de drenagem ou de um curso d'água, maior sua exposição ao extravasamento desse canal em episódios de precipitação intensa. Segundo Tucci (2005), a capacidade de escoamento da rede de drenagem urbana em cidades de porte médio, em geral subdimensionada em relação ao crescimento da mancha urbana, é sistematicamente excedida em eventos de precipitação intensa, produzindo extravasamento tanto de canais artificiais quanto de cursos d'água naturais nas porções mais próximas de sua calha

O próprio Modelo de Grandes Bacias, desenvolvido por Collischonn e Tucci (2001 apud Gossler, 2023) para simular a geração de escoamento em bacias brasileiras de grande porte, parte exatamente dessa mesma relação entre proximidade da rede de drenagem e velocidade de resposta hidrológica, ainda que aplicada em escala e com exigência de dados muito maiores que as deste trabalho.

Por fim, o critério de uso e cobertura do solo introduz, na composição da Suscetibilidade, o único fator de origem antrópica entre os cinco. Crepani *et al.* (2001 apud Conceição, 2023), em metodologia de zoneamento ecológico-econômico desenvolvida no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, classificam a vulnerabilidade das unidades de paisagem também a partir do uso e cobertura da terra, atribuindo maior fragilidade às superfícies mais alteradas pela ação antrópica em detrimento das mais preservadas, mesma lógica que orienta a atribuição de suscetibilidade máxima às classes de uso do solo mais impermeabilizadas nesta pesquisa.

Para Frutuoso, Grigio e Barros (2020 apud Gossler, 2023), esse processo está diretamente associado à urbanização acelerada de bacias litorâneas e urbanas brasileiras, na qual o adensamento populacional e a impermeabilização de novas áreas agravam a obstrução dos sistemas de drenagem e ampliam a ocupação de áreas fisicamente inadequadas.

A mesma relação entre superfície impermeável e degradação da resposta hidrológica de uma bacia foi descrita, em contexto norte-americano, por Arnold e Gibbons (1996) e por Schueler (1994), cujos experimentos mostram que o escoamento gerado por um lote impermeabilizado pode ser muito superior ao gerado pela mesma área coberta por vegetação, em uma mesma chuva de referência.

2.14.2 Fundamentos dos critérios do componente Exposição

Os critérios do componente Exposição respondem, cada um, a uma dimensão distinta daquilo que pode ser afetado por um evento de alagamento ou inundação, e a literatura brasileira sobre vulnerabilidade a inundação em setor censitário oferece um precedente quase direto para a escolha dessas variáveis. Ferreira (2019), em Natal, adota um Índice de Vulnerabilidade a Inundação de Brito (2017) que inclui a população total do setor censitário como a primeira das variáveis do índice, sob o

argumento de que quanto maior a densidade demográfica de uma área ameaçada, maior sua vulnerabilidade. A mesma lógica orienta o critério de densidade populacional adotado neste trabalho, no qual o contingente humano potencialmente atingido é o indicador mais direto do que está em jogo em um evento de alagamento.

A taxa de ocupação construída complementa essa leitura ao expressar a concentração de patrimônio edificado, configurando uma dimensão de exposição distinta da população. Uma área pode reunir alta densidade construtiva com baixa densidade populacional, ou o inverso, e cada configuração implica um tipo diferente de perda potencial, material em um caso, humana e social no outro, associação de superfície construída à intensidade de urbanização já discutida a propósito do critério de uso do solo do componente Suscetibilidade.

Os equipamentos urbanos sensíveis, por fim, respondem a uma lógica de exposição qualitativamente distinta das duas anteriores. Também nesse ponto a literatura brasileira oferece um precedente direto, visto que o mesmo índice de Brito (2017) inclui, entre suas variáveis, a concentração de elementos essenciais (mercados, postos de saúde, bancos), e a densidade de unidades de resposta, como escolas, hospitais e igrejas, que funcionam como pontos de acolhimento em situações emergenciais. Desse modo, a vulnerabilidade do setor aumenta conforme se eleva a concentração desses equipamentos em áreas ameaçadas e se reduz a presença de estruturas de resposta.

Godschalk (2003), ao discutir estratégias de mitigação de risco urbano voltadas à construção de cidades resilientes, chega à mesma conclusão por caminho independente, ao demonstrar que a interrupção de equipamentos estratégicos produz efeitos que extrapolam o ponto exato atingido, ao comprometer serviços dos quais depende uma população mais ampla do que a residente no entorno imediato.

2.14.3 Fundamentos dos critérios do componente Vulnerabilidade

Brito (2017) organizou seu Índice de Vulnerabilidade a Inundação a partir de renda per capita, população em faixas etárias dependentes e taxa de analfabetismo, três das quatro variáveis que compõem o componente Vulnerabilidade desta pesquisa, com a mesma justificativa, pois quanto menor a renda, maior a dificuldade de resiliência diante de um evento extremo, em razão do menor poder aquisitivo

para antecipar, amortecer ou reverter perdas materiais. Logo, comunidades de renda mais baixa tendem a ocupar, também, as áreas de menor valor fundiário de uma cidade, frequentemente coincidentes com terrenos mais suscetíveis a alagamento, o que reforça a sobreposição entre vulnerabilidade social e exposição física em contextos de urbanização desigual, como o de União.

O percentual de população em faixas etárias dependentes, crianças e idosos, segue a mesma variável já validada, na medida em que ambos os grupos apresentam mobilidade reduzida em situações de emergência e maior sensibilidade fisiológica a privações decorrentes de um evento extremo, como interrupção de saneamento ou de acesso a serviços de saúde, isso eleva sua vulnerabilidade relativamente à população em idade adulta e produtiva.

A escolaridade, operacionalizada neste trabalho pela taxa de analfabetismo, repete a variável de mesmo nome empregada por esse índice, sob o argumento de que a população analfabeta apresenta maior dificuldade para compreender e responder a situações de caráter emergencial, funcionando como indicador indireto de acesso à informação de risco e de capacidade de resposta a alertas emitidos por órgãos de defesa civil.

Já a densidade domiciliar, razão entre número de moradores e número de domicílios, expressa o grau de adensamento habitacional de cada setor. Domicílios mais adensados concentram maior número de pessoas por unidade de espaço físico afetável, o que amplia o número de pessoas impactadas por um mesmo evento localizado, e tende a coincidir com padrões construtivos mais precários e menos capazes de resistir a episódios de alagamento, na mesma direção da progressão de vulnerabilidade para territórios ocupados por população de baixa renda (Blaikie *et al.*, 1994).

Segundo Birkmann (2006), ao propor um arcabouço conceitual internacional para a mensuração de vulnerabilidade em sociedades sujeitas a desastres, enquadra esse conjunto de indicadores demográficos dentro do que chama de capacidade de enfrentamento, reforçando por via teórica distinta a mesma escolha de variáveis já sustentada pela literatura brasileira sobre vulnerabilidade a inundações por setor censitário.

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1.1 Aspectos Históricos e Formação Administrativa

A história do município de União, Piauí, é marcada por um processo de formação típico das cidades piauienses, surgidas a partir de fazendas de gado às margens do rio Parnaíba. Segundo Batista *et al.* (2021), a origem do município remonta à instalação da Fazenda Estanhado, considerada a pedra fundamental da formação histórica local, anterior ao século XIX. Essa fazenda, erguida próxima ao rio, contava com uma pequena capela dedicada a Nossa Senhora dos Remédios, o que impulsionou o surgimento de um núcleo populacional em seu entorno, favorecido pela proximidade do rio e pela fertilidade das terras.

Neves (2019) reforça essa perspectiva ao afirmar que a maioria das cidades piauienses tiveram seu povoamento iniciado ao redor das fazendas, que funcionavam como os primeiros marcos de cultura e embriões de futuras vilas e cidades. Castelo Branco Neto (1989) complementa que o modelo de formação dessas vilas envolvia a presença do curral, da capela, do gado e da fé, elementos centrais para o desenvolvimento econômico e populacional, especialmente com a introdução do gado curraleiro pelos portugueses.

Entre os primeiros moradores de destaque está Domingos Fernandes Barbosa, português que teria residido no Estanhado ainda na segunda metade do século XVIII, conforme Ferreira (2008). Ele era genro de Manuel Carvalho de Almeida, que, por sua vez, era ligado a Dom Francisco da Cunha Castelo Branco, um dos primeiros grandes latifundiários da região. As terras herdadas por suas filhas e genros foram fundamentais para a expansão das fazendas e do povoamento local.

Outro personagem importante citado por Sousa (1997) é Francisco José Alves de Holanda, que teria vivido no Estanhado no início do século XIX e é apontado como um dos prováveis fundadores da fazenda e construtor da primeira capela dedicada a Nossa Senhora dos Remédios.

A região também recebeu outros sesmeiros, como Miguel de Oliveira Costa e Inácio Monteiro de Queirós, que instalaram fazendas nas proximidades em meados do século XVIII (Coutinho, 2005). Ricardo José de Lobo, segundo Silva (2017),

tornou-se figura importante ao deter grandes extensões de terra nas duas margens do rio Parnaíba, estabelecendo-se posteriormente no Estanhado e influenciando a política local no século XIX.

O desenvolvimento do povoado ganhou novo impulso com Thomé do Rego Monteiro, pernambucano que se estabeleceu na região no início do século XIX. Sua trajetória, marcada por conflitos de terra e tragédias familiares, está diretamente ligada à formação da povoação que daria origem ao município. Após sua morte, sua esposa Silvéria Joaquina e os filhos, entre eles João do Rego Monteiro (futuro barão de Gurguéia), fixaram-se no Alto Estanhado, consolidando o núcleo populacional (Ferreira, 2008).

A partir de 1813, o Estanhado passou a ser reconhecido oficialmente como povoação, fase marcada por eventos históricos relevantes, como a Batalha do Jenipapo e a Balaiada, que tiveram impacto direto na região (Bastos, 1994). O porto do Estanhado, às margens do rio Parnaíba, foi fundamental para o escoamento da produção e o crescimento econômico, tornando-se um dos principais entrepostos comerciais da província.

No início do século XIX, a construção da capela dos Remédios, financiada por fazendeiros locais como Antônio da Silva Coutinho e João do Rego Monteiro, simbolizou a consolidação do povoado e o desejo dos moradores de se fixarem definitivamente na região. Documentos da época, como o ofício de 1816, já registravam a intenção de erguer uma capela para atender à crescente população local.

O crescimento econômico e populacional do Estanhado levou à solicitação, em 1826, da elevação do povoado à condição de vila, embora a emancipação só tenha ocorrido em 1853. Segundo Nunes (2007), em 1827 já existiam 150 casas no povoado, que se destacava pelo comércio e pela produção agropecuária abastecida pelo rio Parnaíba.

Durante o período como povoação, o Estanhado enfrentou desafios relacionados à segurança, com a presença de criminosos e insubordinação de soldados, conforme relatado por Carvalho (1992). A criação do batalhão da Guarda Nacional, comandado por João do Rego Monteiro, foi uma resposta à necessidade de reforço militar e à importância estratégica do local.

Em resumo, a formação do município de União foi resultado de um processo gradual de ocupação, impulsionado pela pecuária, pela navegação no rio Parnaíba e

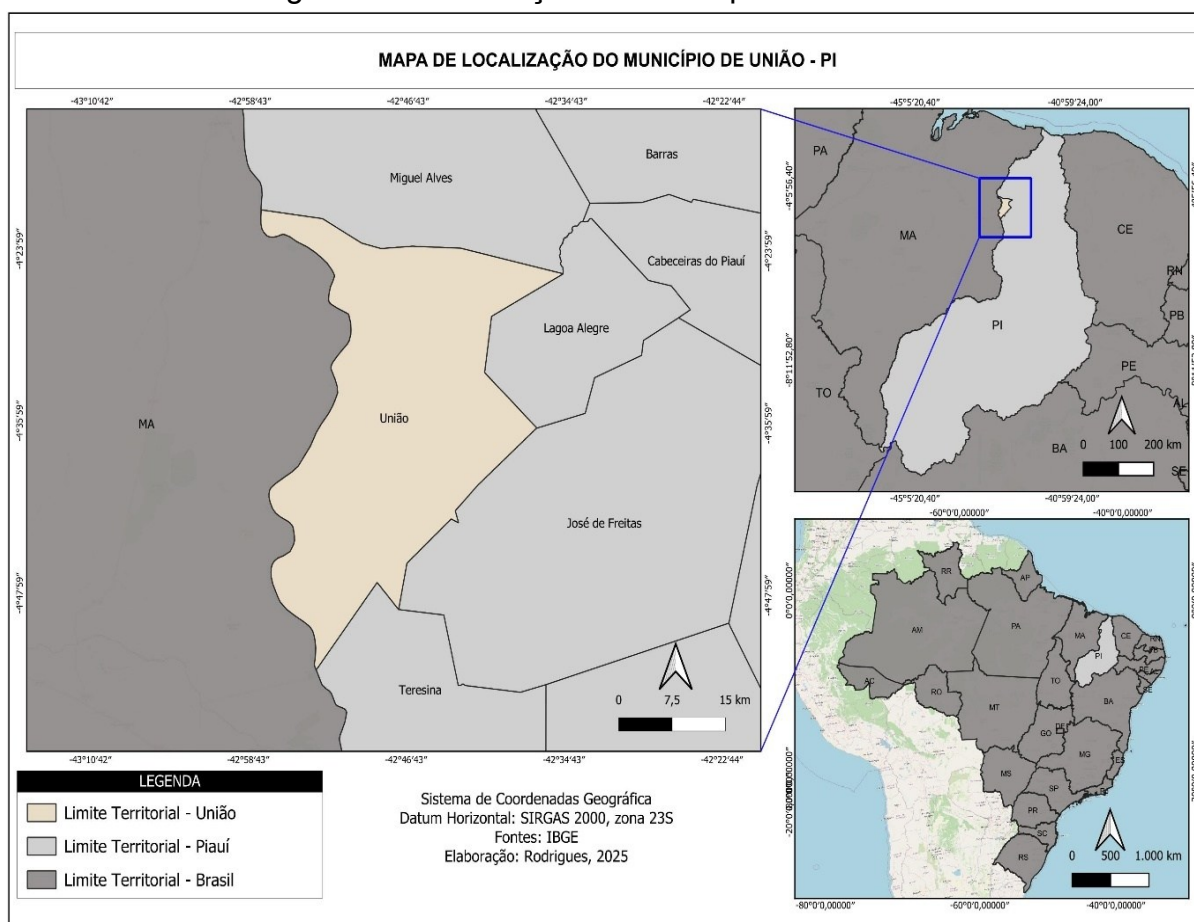
pela atuação de famílias e personagens marcantes, cujas trajetórias foram registradas por diversos autores e documentos históricos.

3.1.2 Localização e Caracterização

O município de União está localizado 56 km ao norte da cidade de Teresina, às margens do rio Parnaíba. Geograficamente está posicionado entre as coordenadas 04°35'09" de latitude sul e 42°51'51" de longitude oeste, integrando mesorregião Centro-Norte Piauiense, a microrregião de Teresina e o Território de Desenvolvimento Entre Rios.

Ao Norte o município faz limite com Miguel Alves; ao Sul limita-se com os municípios de Teresina, José de Freitas e o Estado do Maranhão; a Leste com o município de José de Freitas/Lagoa Alegre; a Oeste com Estado do Maranhão (IBGE, 2025), segundo a Figura 3 – Localização do Município de União-PI.

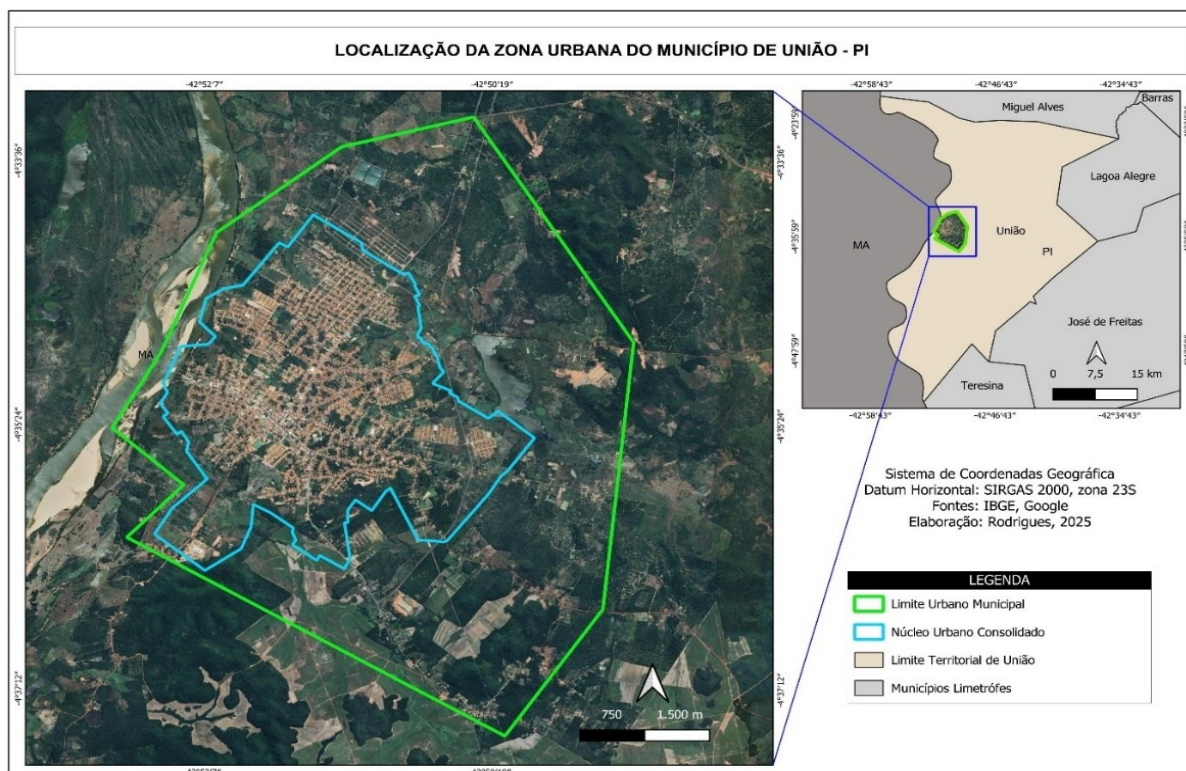
Figura 3 – Localização do Município de União-PI



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

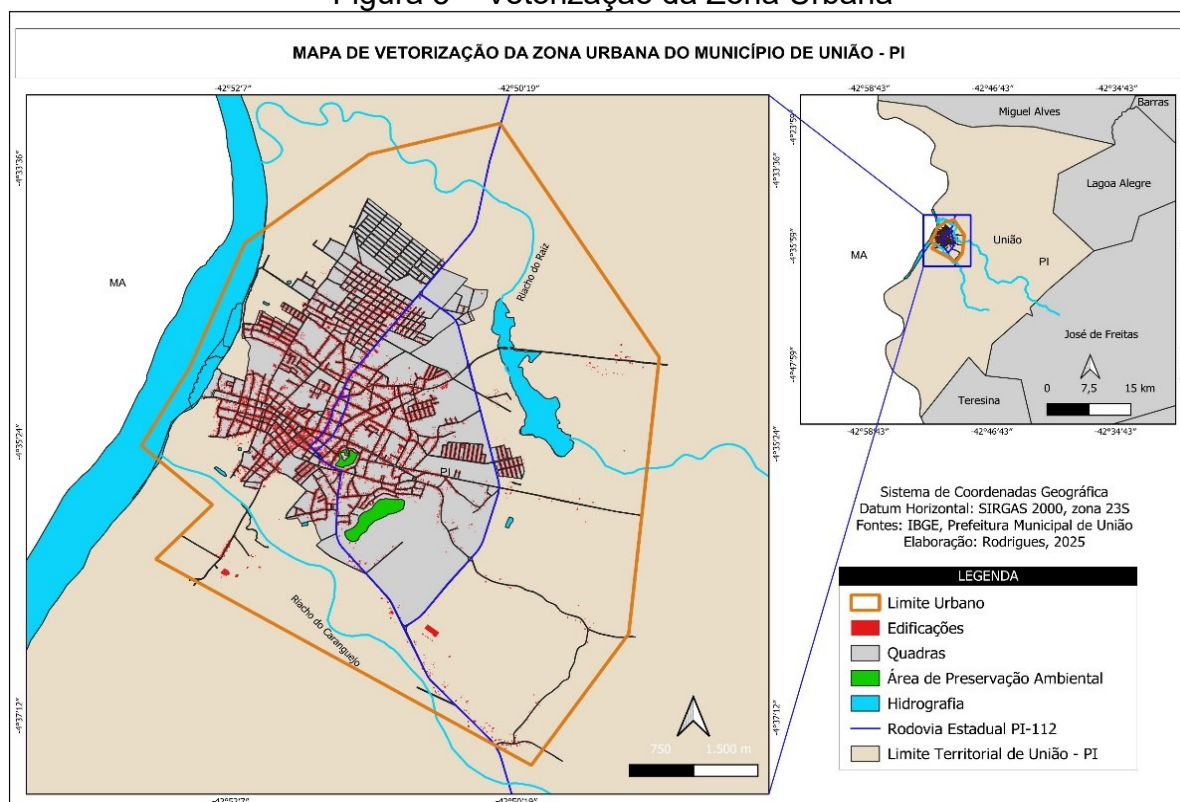
A área de estudo será delimitada pela zona urbana do município, definida pelo Plano Diretor vigente, com foco na região do núcleo urbano consolidado, conforme a Figura 4 – Localização da área de estudo, e a Figura 5 – Vetorização da Zona Urbana

Figura 4 – Localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

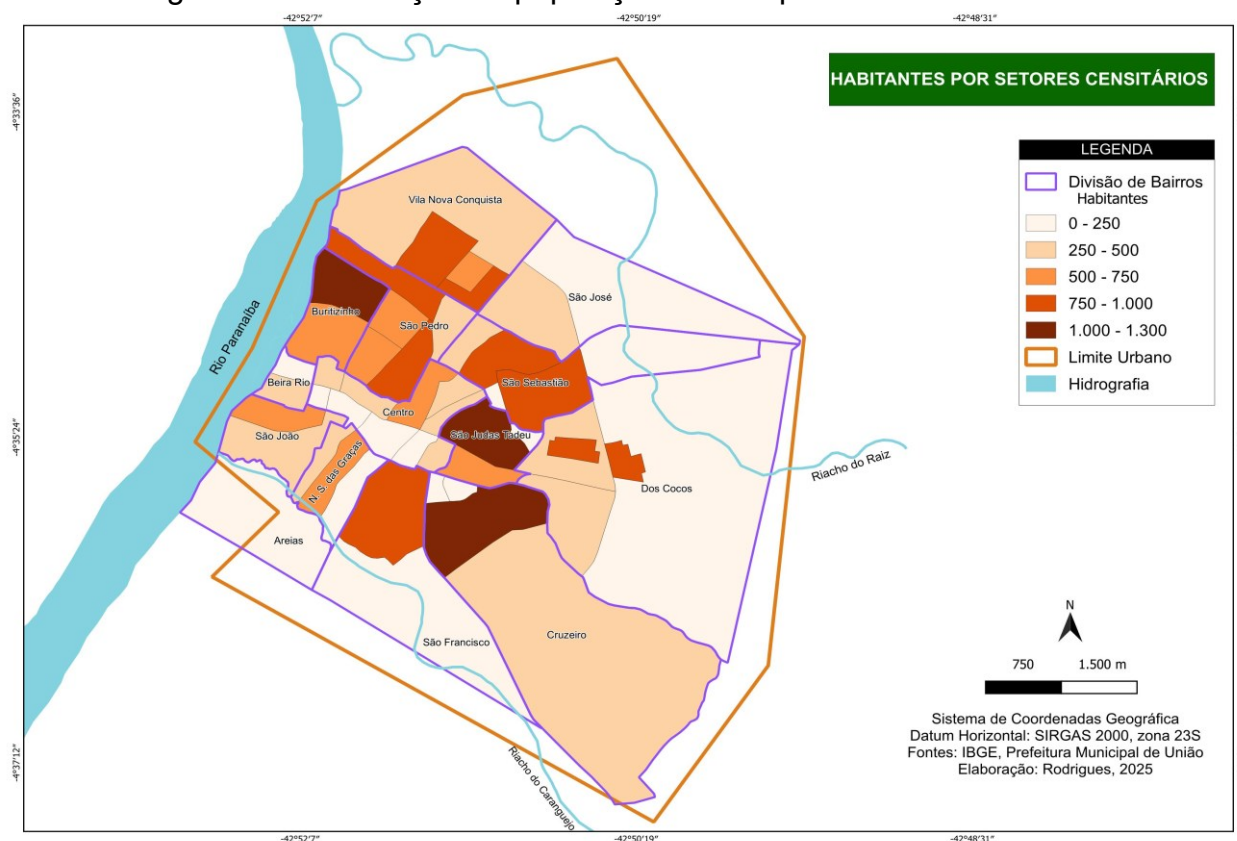
Figura 5 – Vetorização da Zona Urbana



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

De acordo com o último Censo Demográfico, o município de União apresenta uma população total de 46.119 habitantes, com uma densidade demográfica de 39,39 habitantes por km², considerando sua área territorial de 1.170,76 km², apresentando uma taxa de crescimento anual de 0,65%. A maior parte dos habitantes encontra-se concentrada na zona urbana, que abriga cerca de 51,9%, enquanto o setor rural mantém 48,1% da população. A estrutura por sexo revela leve predominância feminina, com 50,3% de mulheres e 49,7% de homens (IBGE, 2022). A Figura 6 – Distribuição da população urbana por setores censitários, apresenta a distribuição espacial da população na zona urbana do município, considerando a divisão por setores censitários.

Figura 6 – Distribuição da população urbana por setores censitários



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com cerca de 8,8 km² de área urbanizada, o município possui 2.016 pessoas expostas aos riscos de inundações, enxurradas e deslizamentos, segundo o IBGE (2024). União está localizada ainda na região mais chuvosa do estado do Piauí, com precipitação média anual superior a 1500 mm (Morais; Abreu, 2021).

Sobre o planejamento urbano, a cidade elaborou seu primeiro Plano Diretor no ano de 2006, aprovado pela Lei Municipal nº 494/2006, e recentemente realizou a revisão do mesmo estabelecendo um novo plano, sob a Lei nº 886/2024. Este é o instrumento global e estratégico da política de desenvolvimento e ordenamento territorial, determinante para todos os agentes públicos e privados que atuam no município. Porém, o que se observa nos últimos anos é que somente agora, após essa revisão, essas diretrizes estão começando a ser implementadas de forma concreta, destaque para a delimitação de áreas de preservação ambiental, ocorrida esse ano. Antes, o pouco que era colocado em prática, ficava voltado principalmente para a fiscalização da execução de obras no quesito uso e ocupação do solo, onde ocorre a análise dos projetos para retirada do alvará de construção.

Em relação ao uso e ocupação do solo, União dispõe da Lei Municipal nº

890/2024 que substitui a lei anterior do ano de 2006 e detalha o novo zoneamento do espaço urbano, configurado como: Zona Urbana Consolidada (ZUC), Zona Urbana em Consolidação (ZUEC), Zona de Ocupação Restrita (ZOR), destinada ao controle do adensamento em áreas alagáveis, Zona Verde (ZV), Zona de Expansão Urbana (ZEU), Zona de Transição Urbano-Rural (ZTUR) e Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS). Cada uma dessas zonas possui objetivos e restrições específicas.

Assim como o Plano Diretor, o município de União também possui o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB), instituído pela Lei Municipal nº 665/2016, e que está em fase de revisão. O plano atual estrutura-se em quatro eixos fundamentais: o abastecimento de água potável, o esgotamento sanitário, o manejo de resíduos sólidos, e o manejo das águas pluviais.

No que tange aos três primeiros eixos do PMSB, a cidade está bem amparada destes serviços, pois possui uma rede estruturada de abastecimento de água, esgotamento sanitário atendendo 93,00% da população na zona urbana e coleta de lixo diária com destinação final já para o aterro sanitário que está em fase de conclusão. Todavia, no que se refere ao manejo das águas pluviais, que compreende o planejamento e a manutenção das redes de drenagem para controle de alagamentos, preservação da permeabilidade do solo e mitigação de impactos sobre o meio urbano, a cidade ainda é totalmente carente.

O sistema de drenagem urbana do município, apresenta uma configuração ainda incipiente, refletindo o processo histórico de urbanização sem o devido acompanhamento por obras de infraestrutura pluvial planejadas. A cidade não dispõe de um sistema de drenagem estruturado e abrangente, as intervenções existentes concentram-se em um pequeno trecho de galeria na região central e 28 bueiros ou boca de lobo (IBGE, 2022). Fora dessa área, o escoamento superficial das águas pluviais ocorre de forma predominantemente espontânea, conduzido pelos meios-fios das vias, sarjetas e pela declividade natural do terreno, com diversos bueiros espalhados atuando como pontos de travessia hidráulica.

A ausência de rede coletora contínua faz com que o escoamento dependa diretamente das condições topográficas, sendo drenado para cursos d'água que funcionam como exutórios naturais do sistema urbano: o Riacho da Raiz, ao norte, o Riacho do Caranguejo, ao sul, e o Rio Parnaíba, a leste. Essa configuração resulta em uma drenagem essencialmente natural, sem controle técnico de vazões ou

dispositivos de amortecimento de cheias, o que contribui para a possibilidade de alagamentos pontuais, erosões e degradação das margens dos córregos urbanos.

Além da precariedade da infraestrutura física, a falta de um plano municipal específico para drenagem urbana, compromete a integração desse setor às demais políticas de saneamento e uso do solo. A cidade carece de diretrizes técnicas para dimensionamento, manutenção e expansão do sistema, bem como de mecanismos de monitoramento hidrológico. Na prática, a drenagem urbana em União opera de modo empírico, sustentada pela morfologia natural do relevo e pela rede hidrográfica superficial, sem dispositivos artificiais capazes de regular a velocidade de escoamento ou reduzir a carga de sedimentos transportada.

Essa condição evidencia uma vulnerabilidade típica de centros urbanos de pequeno porte, onde o adensamento progressivo com um crescimento urbano desorganizado, a impermeabilização do solo e a ausência de gestão integrada da drenagem ampliam a exposição a riscos hidrológicos. Diante desse quadro, o diagnóstico do município revela a necessidade urgente de elaboração de um Plano Diretor de Drenagem Urbana, capaz de estabelecer critérios técnicos, áreas prioritárias de intervenção e estratégias de compatibilização entre o crescimento urbano e a dinâmica natural das águas pluviais.

3.1.3 Aspectos Fisiográficos

3.1.3.1 Vegetação, Pedologia, Geologia e Geomorfologia

Segundo dados do Banco de Dados e Informações Ambientais (BDIA,2023), a cobertura vegetal do município de União apresenta um padrão marcadamente heterogêneo, composto por fitofisionomias de cerrado e formações florestais semidecíduais, além de áreas em diferentes estágios de uso agrícola e regeneração. As classes predominantes no município são: Savana Arborizada (44,14%) e Floresta Estacional Semidecidual Submontana (27,74%), seguidas por Vegetação Secundária (19,63%), Agricultura (4,82%) e pequenas frações de Savana-Estépica Arborizada e reflorestamento.

A paisagem vegetal caracteriza-se por um mosaico de formações que expressam a posição de transição entre os domínios fitogeográficos do Cerrado, da Caatinga e da Mata dos Cocais. Essa diversidade resulta tanto das condições

naturais, como clima tropical com estação seca bem definida e solos predominantemente arenosos e rasos, quanto da ação antrópica prolongada sobre o território. Logo, temos a ocorrência local de espécies e formações associadas a essas regiões, como pastagens, gramíneas, espécies arbóreas mais abertas, e vegetação típica da Caatinga em locais mais secos.

A elevada proporção de vegetação secundária aponta para processos recentes ou históricos de perturbação antrópica (desmatamento, uso agrícola e pastagens).

Em relação aos solos, compreendem principalmente plintossolos álicos de textura média, fase complexo campo maior. Solos podzólicos vermelho-amarelos, plínticos e não plínticos com transições vegetais caatinga/cerrado caducifólio, floresta ciliar de carnaúba e caatinga de várzea e, secundariamente, solos arenosos essencialmente quartzosos, profundos, drenados, desprovidos de minerais primários, de baixa fertilidade, com transições vegetais, fase caatinga hiperxerófila e/ou cerrado sub-caducifólio/floresta sub-caducifólia e/ou carrasco (CPRM, 2004).

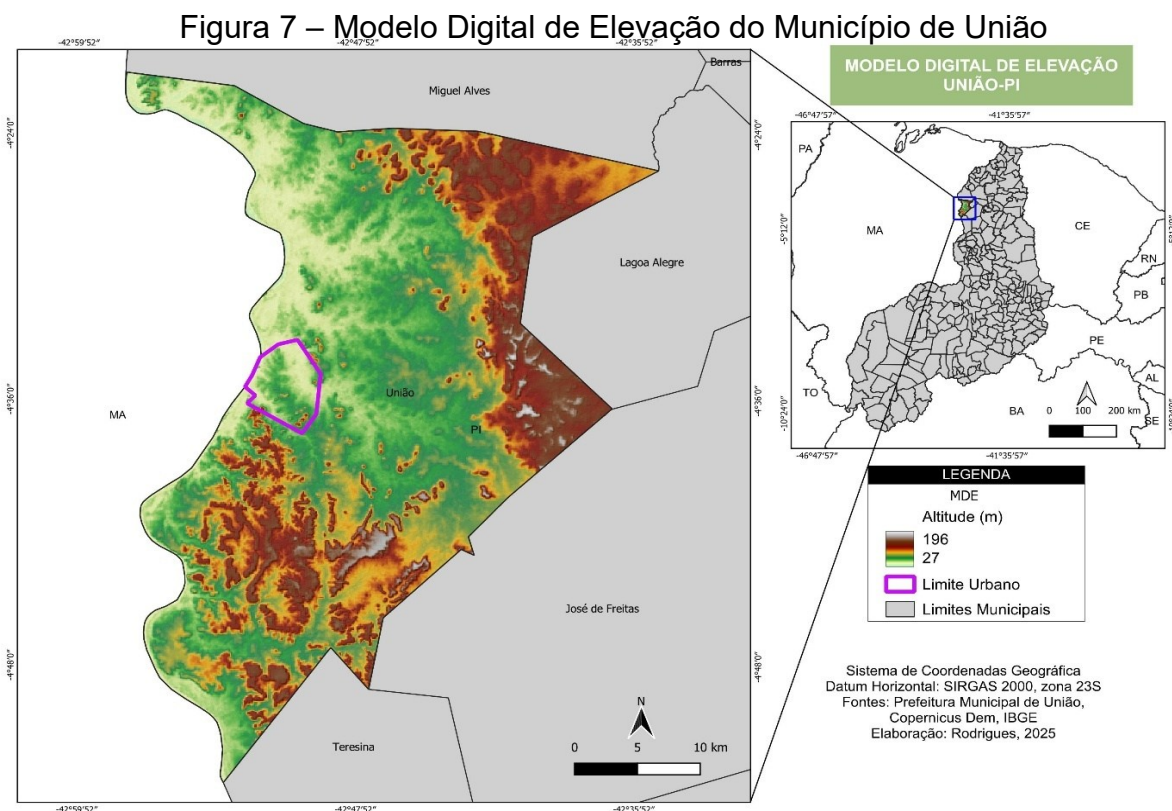
Geomorfologicamente, o município de União está inserido no contexto da Bacia Sedimentar do Parnaíba, apresentando um relevo de baixa amplitude altimétrica e formas predominantemente suaves, moldadas por longos processos de dissecação e deposição. O território municipal é compartimentado em cinco unidades principais: Baixada de Campo Maior, Patamares do Parnaíba, Tabuleiros do Parnaíba, Planícies e Terraços Fluviais e Vãos do Médio Parnaíba, além de pequenas áreas correspondentes aos corpos d'água continentais associados ao rio Parnaíba (BDIA, 2023).

A Baixada de Campo Maior ocupa uma parcela expressiva da porção central e setentrional de União, configurando superfícies deprimidas e suavemente onduladas, com altitudes geralmente inferiores a 150 metros. Essas áreas concentram sedimentos recentes e solos mal drenados, o que favorece a formação de brejos e o acúmulo de águas pluviais durante o período chuvoso. São terrenos de natureza predominantemente deposicional, onde se verifica maior suscetibilidade à inundação e à erosão laminar.

Sobre os aspectos geológicos o município possui várias camadas que formam o solo e o subsolo, iniciando pelos Depósitos Aluvionares, que são áreas de areia e cascalho deixadas pelos rios mais recentes. Logo depois, o Grupo Barreiras aparece com arenito, conglomerado e folhelho, resultado de antigos ambientes de rios e

mares. Descendo mais, a Formação Pedra de Fogo se destaca por reunir arenito, folhelho, calcário e silexito, mostrando marcas de lagos e planícies salinas do passado, e em seguida a Formação Piauí traz arenito, siltito, folhelho e calcário, indicando outras mudanças ambientais ao longo do tempo. Por fim, a Formação Poti, composta por arenito, folhelho e siltito, representa os registros mais antigos (CPRM, 2004).

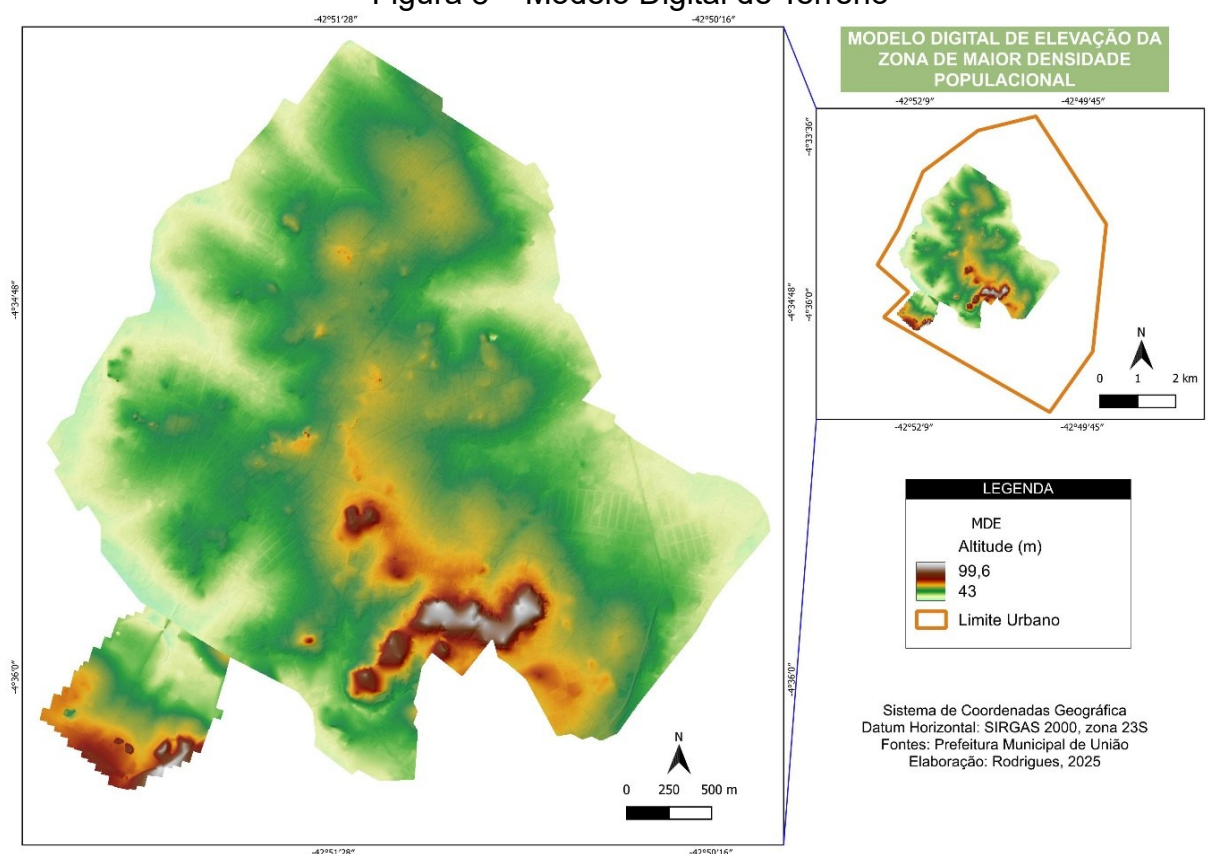
Tratando-se do relevo, a Figura 7 – Modelo Digital de Elevação do Município de União, demonstra que as maiores altitudes do município estão localizadas na região Nordeste e Sudoeste, chegando a quase 200 metros de altitude em sua parte mais elevada, enquanto as regiões com as menores cotas altimétricas encontram-se no Centro-Norte.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A zona urbana apresenta uma altitude média de 52 metros acima do nível do mar, chegando em seu ponto mais elevado a quase 100 metros, conforme a Figura 8 – Modelo Digital de Terreno.

Figura 8 – Modelo Digital de Terreno



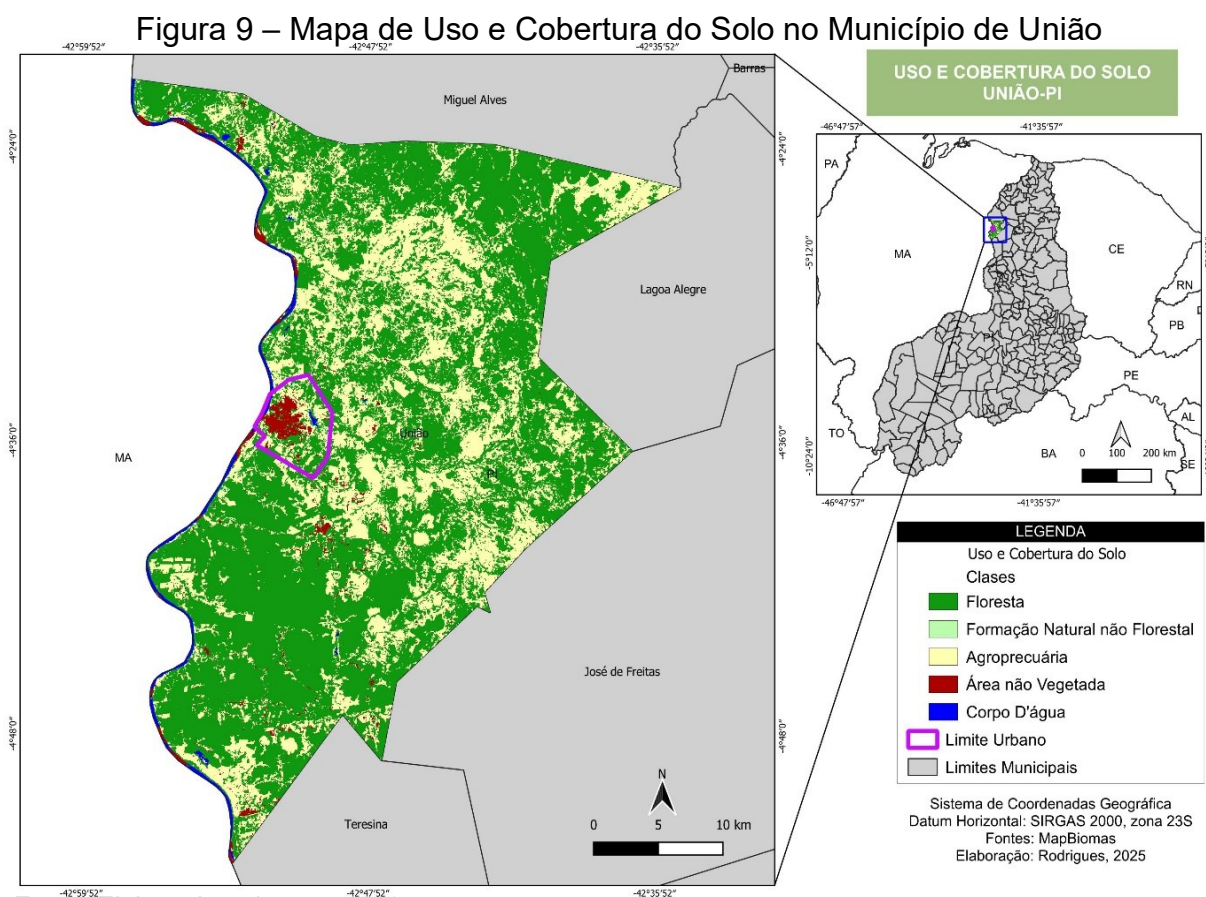
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Em relação ao uso e cobertura da terra, de acordo com os dados do MapBiomas (2023), o município de União apresenta predominância de formações florestais, que correspondem a cerca de 65,6% do território. Essa cobertura está associada às formações savânicas e florestas estacionais do bioma Cerrado, indicando presença significativa de vegetação nativa em bom estado de conservação, especialmente nas porções sul e sudoeste.

A agropecuária ocupa aproximadamente 31,3% e representa o principal uso antrópico do solo em União. As áreas produtivas concentram-se ao longo das vias de acesso e em comunidades rurais, com predomínio de pastagens abertas e mosaicos de uso agropecuário. Trata-se de um padrão de ocupação extensiva, que avança sobre áreas anteriormente florestadas, refletindo o processo de conversão gradual da vegetação nativa para uso econômico, especialmente nas zonas de transição e entorno urbano. Destaque para a produção de cana-de-açúcar, principal espécie agrícola produzida no município

As áreas não vegetadas e urbanizadas somam 1,7%, enquanto os corpos hídricos representam cerca de 1%. Embora o município ainda mantenha equilíbrio

entre áreas naturais e antrópicas, observa-se uma tendência de redução da cobertura florestal e ampliação das áreas agropecuárias. A Figura 9 – Mapa de Uso e Cobertura do Solo no Município de União, mostra a caracterização de todas essas áreas no município de União.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

3.1.3.2 Clima

O Piauí está localizado em uma faixa de transição climática e apresenta diferentes características, tendo parte do seu território influenciado pela considerável umidade oriunda da Amazônia e outra a influência da semiaridez do Nordeste Oriental. Essa combinação faz com que o estado apresente alternâncias na ocorrência e na circulação das águas em seu território, ainda que cerca de 80% de seu espaço esteja assentado em uma estrutura geológica de rochas sedimentares (Lima, 2017).

O município de União possui clima tropical alternadamente úmido e seco, com duração do período seco de seis meses e precipitação pluviométrica média anual de

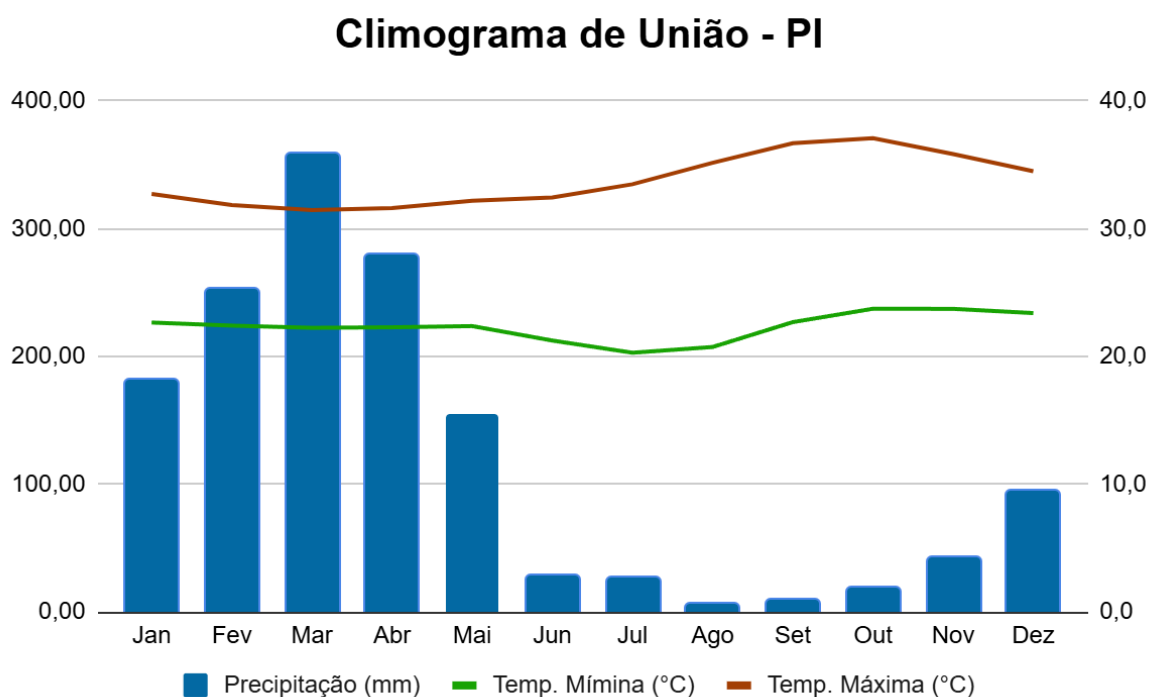
1.440,7 mm (CEPRO, 2011).

De acordo com a Classificação de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948 apud Andrade et al., 2004) União está localizada na sub-região climática AW (Megatérmico úmido e subúmido com inverno seco). Trata-se de clima quente e seco, caracterizado por um período chuvoso, de janeiro a junho, e um período de estiagem, durante o restante do ano.

Em relação às médias de mínima e de máxima temperatura, estas variam entre 21°C a 36° C (CEPRO, 2011). De modo geral, observa-se no território piauiense a ocorrência das maiores médias de temperatura do ar à superfície serem registradas na estação do verão e as menores na estação do inverno (Lima; Júnior, 2020).

A Figura 10 – Climograma do Município de União, apresenta o gráfico climático do município com a média de precipitação e temperatura em um intervalo de 30 anos, de 1993 a 2023, onde resume os principais elementos do regime climático local, demonstrando a interação entre a precipitação pluvial mensal e as variações sazonais das temperaturas mínima e máxima ao longo do ano.

Figura 10 – Climograma do Município de União



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se que o padrão climático do município é tipicamente tropical, com estação chuvosa bem definida de janeiro a maio, alcançando a maior precipitação em março, mês em que ultrapassa os 350 mm. Após esse período úmido, o volume de precipitação declina significativamente, atingindo valores mínimos nos meses de junho a outubro, situação característica do norte do Piauí.

As temperaturas acompanham a tendência de estabilidade própria de climas tropicais. As máximas mensais variam da casa dos 32°C na transição chuvosa para até 36°C nos meses mais secos, principalmente entre setembro e novembro. Já as mínimas variam levemente, mantendo-se próximas a 22°C durante o pico das chuvas, até cerca de 24°C no período de estiagem. Este padrão indica não só uma baixa amplitude térmica anual, mas uma constância de calor em quase todo o ciclo, um fator determinante no balanço hídrico do território. Com base no perfil dessas curvas e dados históricos regionais, é possível afirmar que a temperatura média anual de União-PI gira em torno de 27°C, valor que reflete a realidade térmica do centro-norte piauiense ao longo das últimas décadas.

Essa dinâmica, marcada por chuvas intensas, porém concentradas, e temperaturas elevadas durante doze meses, cria um cenário climático propício para a ocorrência de riscos hidrológicos, além de impor desafios à agricultura, abastecimento e à própria expansão da malha urbana.

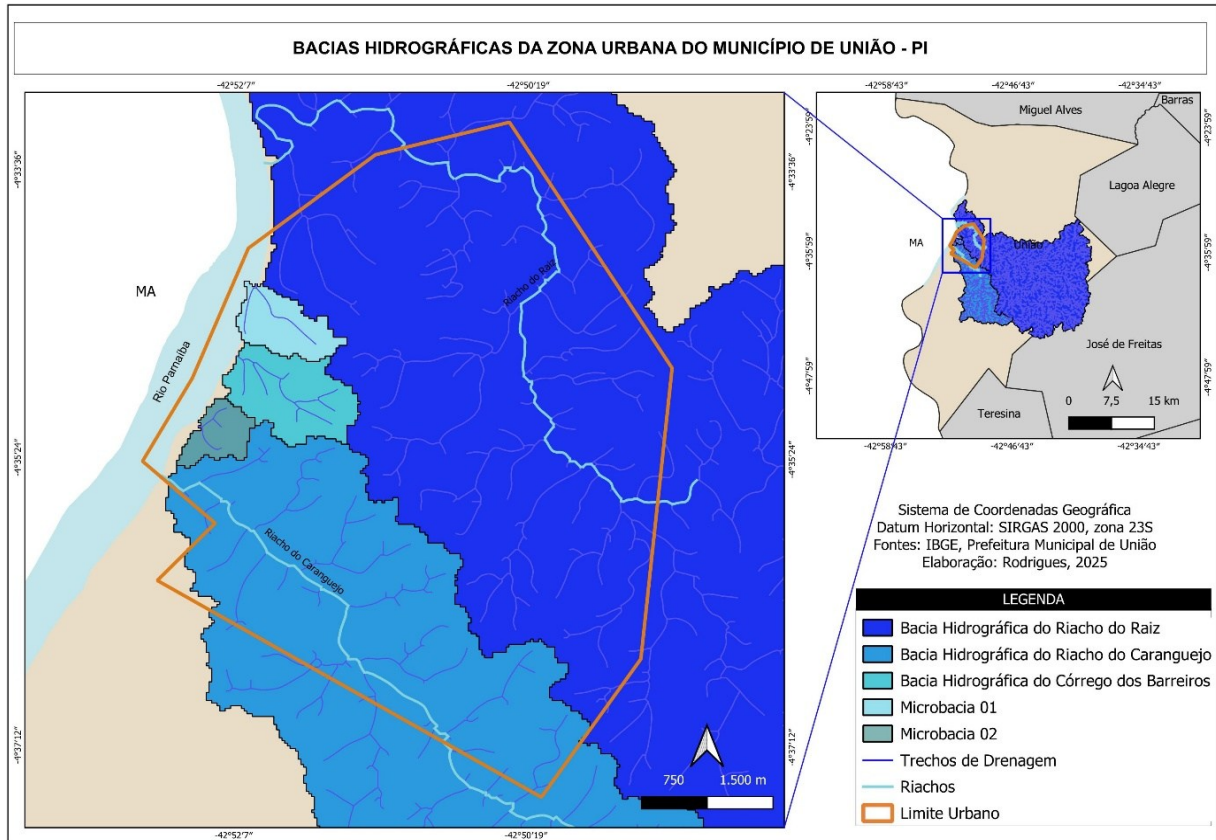
3.1.3.3 Bacias Hidrográficas da Zona Urbana

Como já foi visto, a cidade de União se desenvolveu às margens do Rio Parnaíba, e é cortada por vários cursos d'água (cerca de 15 córregos principais), onde a ocupação urbana se deu às margens de praticamente todos eles. Este estudo definiu como foco a zona urbana do município, e a mesma apresenta 5 bacias hidrográficas, onde 3 estão totalmente inseridas no seu perímetro e outras duas estão parcialmente dentro do mesmo.

Conforme pode ser visto na Figura 11 – Localização das Bacias Hidrográficas, as bacias foram denominadas como: Microbacia 01 (0,65 km²), Microbacia 02 (0,41 km²), Bacia do Córrego dos Barreiros (1,20 km²), Bacia do Riacho da Raiz (309,00 km²) e Bacia do Riacho do Caranguejo (70,00 km²), conforme visualizado através da Figura 9. Os principais corpos d'água são o Riacho da Raiz (32 km), Riacho do Caranguejo (20 km) e Córrego dos Barreiros (1,4 km), todos drenando para o Rio

Parnaíba.

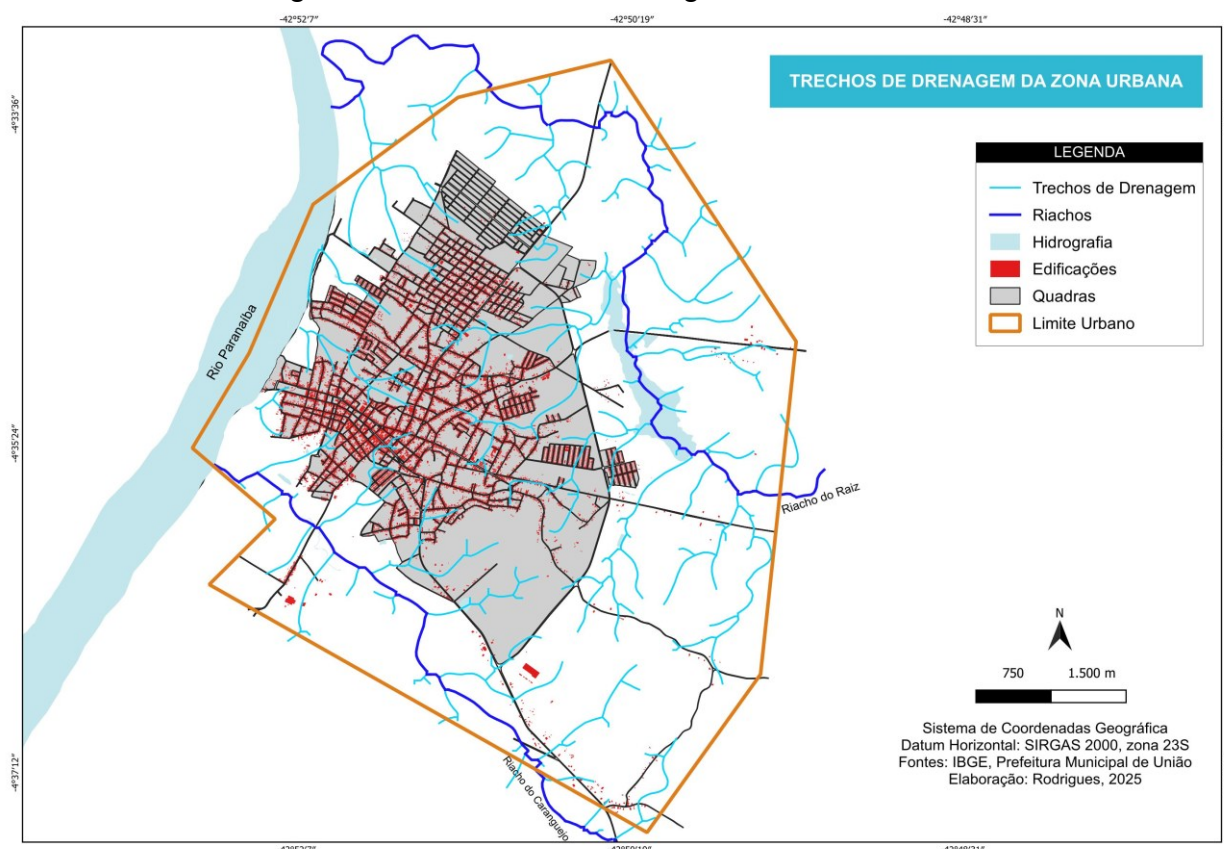
Figura 11 – Localização das Bacias Hidrográficas



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com exceção do Riacho da Raiz, os demais talvegues principais mantêm seu curso natural, até alcançarem seus exutórios no Rio Parnaíba, sem canalização e intervenções significativas em seu leito ou regime de escoamento. A Figura 12 – Trechos de drenagem da Zona Urbana, apresenta os trechos de drenagem localizados na zona urbana do município.

Figura 12 – Trechos de drenagem da Zona Urbana



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O Riacho da Raiz nasce no Município de José de Freitas – PI, e chega na zona urbana de União pelo lado leste, seguindo ao norte, até desaguar no Rio Parnaíba, percorrendo aproximadamente um total de 32 km, sendo responsável por receber metade volume de água drenado na cidade. Ao adentrar a zona urbana o riacho não atravessa áreas densamente habitadas, o que permitiu a construção da Barragem Filinto Rêgo, apresenta na Figura 13 – Barragem Filinto Rêgo. Essa estrutura, implantada no leito principal do curso d'água, modificou seu comportamento hidrológico, interrompendo o escoamento natural e formando um reservatório com aproximadamente 471.000,00 m² e cerca de 2.000.000,00 m³, utilizado tanto para contenção de cheias quanto para regularização da vazão a jusante, bem como para projetos de irrigação.

Figura 13 – Barragem Filinto Rêgo



Fonte: Acervo de Marcos Danilo (2025).

A partir desse ponto, o riacho passa a escoar de maneira controlada, com regime alterado em relação ao trecho montante, o que influencia diretamente os processos de drenagem urbana, deposição de sedimentos e dinâmica de recarga do solo. Essa interferência evidencia a relação entre as intervenções antrópicas e o comportamento hidrológico dos cursos d'água que atravessam a área urbana de União. Sua última grande cheia foi no ano de 1985, onde chegou a ultrapassar a cota de uma ponte em um trecho da Rodovia PI-112.

Figura 14 – Passagem sobre o Córrego dos Barreiros



Fonte: Google Street View (2024).

Assim como o Riacho da Raiz, o Riacho do Caranguejo situa-se parcialmente na zona urbana do município, mais especificamente na região sul, tendo sua nascente na zona rural de União, na localidade Soares. O curso d'água percorre aproximadamente 20 km até desaguar no Rio Parnaíba. No trecho urbano, o riacho não atravessa áreas densamente ocupadas, o que reduz o risco direto à população. Entretanto, durante períodos de cheia, transborda e provoca transtornos ao ultrapassar a cota de um logradouro público por onde passa, como na Figura 15 – Transbordamento do Riacho do Caranguejo (Zona Urbana de União).

Figura 15 – Transbordamento do Riacho do Caranguejo (Zona Urbana de União)



Fonte: Acervo de José Santana Carneiro (2020).

Já o Córrego dos Barreiros encontra-se no centro da zona urbana do município, formado por uma nascente e pequenos trechos que drenam para seu leito, percorrendo cerca de 1,4 km até desaguar no Rio Parnaíba. Diferentemente dos riachos já mencionados, o Córrego dos Barreiros atravessa áreas com considerável ocupação, embora seu curso natural tenha sido mantido sem canalização. A proximidade com a população, no entanto, contribui para seu assoreamento e poluição, principalmente devido ao descarte irregular de lixo em seu leito. Em relação a transtornos causados, o seu trecho mais crítico situava-se na interseção com a Rua Arão Lobão, importante eixo viário, pois o transbordamento causava danos ao logradouro. Porém, intervenções posteriores incluíram a implantação de tubos hidráulicos bem dimensionados que garantiram a continuidade do fluxo adequado do córrego.

A Microbacia 01 abrange partes dos bairros São Pedro e Buritizinho, conservando ainda um trecho considerável de drenagem natural. Seu curso principal mantém-se parcialmente preservado, com pequenos canais que conduzem o escoamento superficial em direção ao Rio Parnaíba. Essa drenagem ocorre predominantemente em áreas sem ocupação consolidada, o que permite a manutenção do escoamento em leito natural, com menor interferência antrópica sobre sua dinâmica hidrológica. O relevo suavemente inclinado favorece o direcionamento das águas pluviais até o exutório, contribuindo diretamente para o regime hídrico do rio. Apesar de sua área reduzida, a microbacia exerce papel importante na coleta e condução das águas superficiais provenientes de setores adjacentes. É importante destacar que o leito do córrego principal está em risco de assoreamento, visto que parte do local está em obras para construção de unidades habitacionais.

Sobre a Microbacia 02, observa-se um cenário distinto, pois está localizada em um setor de ocupação densa, entre os bairros Beira-Rio e São João, apresentando alta taxa de impermeabilização, decorrente da substituição quase total da cobertura natural por edificações e vias pavimentadas. Como consequência, o escoamento superficial tornou-se o principal processo de drenagem, e o sistema natural foi gradualmente substituído por estruturas artificiais, como sarjetas e meios-fios.

Sobre a proximidade com o Rio Parnaíba, União possui histórico de enchentes e inundações, relatado ao longo do tempo. Segundo Batista et al. (2021),

os registros mais antigos datam do século XIX, quando 1838, registra-se uma das maiores cheias no então povoado Estanhado. Sucedendo a grande seca de 1915, em 1917 o rio causa novamente inundações na cidade, gerando prejuízos e multiplicando desabrigados. A mesma coisa se repetiu dez anos depois, em 1927. Coincidentemente, vinte anos depois, repetiu-se a cena. Lavouras e criações foram perdidas, riachos e lagoas transbordaram. Uma Comissão de Socorros Públicos foi criada para amparar os alagados. Novas cheias foram vistas em 1960 (uma das maiores) e outra em 1985. Recentemente, as mais abrangentes foram em 2004, 2009, como mostra a Figura 16 – Cheia em 2009, e em 2015, onde o rio, segundo mostra a Figura 17 – Inundação no Bairro Beira-Rio, alcançou a calçada do Parque Beira-Rio.

Figura 16 – Cheia em 2009



Fonte: Wilson Nanaia (2009).

Figura 17 – Inundação no Bairro Beira-Rio

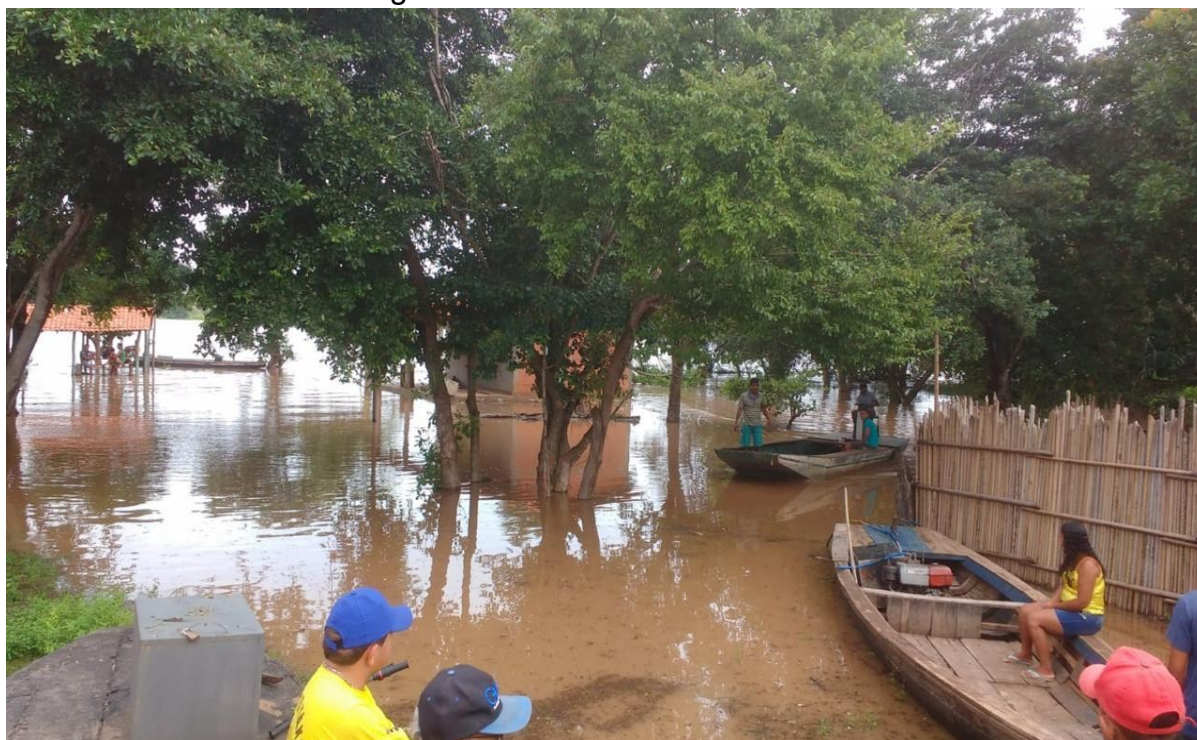


Fonte: Enzimar Azevedo (2015).

As microbacias 01 e 02, juntamente com a bacia do Córrego dos Barreiros, correspondem às porções mais baixas e ribeirinhas da zona urbana de União-PI, situadas junto ao Rio Parnaíba e aos canais naturais de drenagem, em áreas de várzea e terrenos de menor altitude, onde a concentração de águas pluviais durante chuvas intensas é mais expressiva. São também os setores onde a população mais sofreu os impactos diretos das inundações em União-PI, por concentrarem grande parte das moradias junto ao leito desses cursos d'água.

Nesses trechos, a ocupação avançou tanto sobre as margens do rio quanto ao longo dos canais de drenagem secundária. As edificações ali construídas ficam sujeitas à recorrência de eventos de cheia e de escoamento superficial concentrado, como registra a Figura 18 – Cheia no Rio Parnaíba, que documenta um desses episódios de transbordamento sobre a área urbana.

Figura 18 – Cheia no Rio Parnaíba



Fonte: Acervo de José Santana Carneiro (2018).

Combinam-se, nesses setores, baixa declividade do terreno e elevado grau de impermeabilização do solo, o que reduz a capacidade de infiltração e sobrecarrega a drenagem pluvial urbana, insuficiente para o volume escoado nesses pontos, como mostra a Figura 19 – Alagamento em Via Urbana. A análise detalhada dessas condições é o que permite, nas seções seguintes, o mapeamento das áreas de risco e a definição de medidas de prevenção e planejamento urbano.

Figura 19 – Alagamento em Via Urbana



Fonte: Acervo do Autor (2025).

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Quanto à sua natureza, esta pesquisa caracteriza-se como aplicada, uma vez que seus resultados se destinam a subsidiar diretamente as ações de planejamento urbano e de gestão de risco no município de União, e não a discussão teórica de um método já consolidado. Quanto à abordagem do problema, classifica-se como quantitativa e espacial, pois opera sobre variáveis mensuráveis, especializadas e combinadas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Quanto aos procedimentos técnicos, apoia-se no geoprocessamento e na análise multicritério, que constituem, respectivamente, o meio de tratamento dos dados espaciais e o método de integração dos diferentes fatores de risco (Gil, 2002). Essa combinação é recorrente em estudos de mapeamento de risco hidrológico urbano, que dependem de reunir, em uma mesma base territorial, informações de naturezas físicas, sociais e econômicas.

A estratégia metodológica adotada decompõe os fatores de risco de alagamentos e inundações urbanas em três componentes distintos, tratados de forma independente e combinados apenas na etapa final: a **Suscetibilidade**, que

expressa a predisposição física do território à ocorrência do fenômeno; a **Exposição**, que corresponde à presença de pessoas, edificações e serviços nas áreas suscetíveis; e a **Vulnerabilidade**, que traduz a capacidade diferenciada da população de suportar, responder e se recuperar dos efeitos do evento.

Essa decomposição não constitui um detalhe formal de organização, mas uma decisão metodológica que preserva informação relevante para o planejamento. A redução dos três componentes a um único indicador ocultaria diferenças determinantes, uma vez que um setor pode reunir condições físicas favoráveis ao alagamento sem concentrar, na mesma proporção, população ou infraestrutura expostas, assim como dois setores igualmente expostos podem apresentar capacidades de resposta muito distintas, conforme sua renda, escolaridade ou adensamento domiciliar.

A unidade espacial de análise adotada em todo o trabalho é o setor censitário urbano, menor porção territorial para a qual o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) divulga dados demográficos e socioeconômicos. Essa escolha atende simultaneamente a duas exigências do estudo. A primeira diz respeito à compatibilidade entre a escala dos dados e a escala da análise: por serem publicados já agregados por setor, os dados que alimentam a Exposição e a Vulnerabilidade podem ser trabalhados exatamente na unidade em que são interpretados e cartografados. Não é necessária desagregação, reamostragem ou estimativa intermediária, procedimentos que introduziriam incerteza no resultado.

A segunda refere-se à capacidade de discriminação intraurbana: o setor censitário é suficientemente detalhado para distinguir porções contíguas da malha urbana que recortes mais amplos, como o bairro ou o município, tenderiam a homogeneizar. Dessa escolha decorre uma consequência operacional, que são os critérios do componente Suscetibilidade, os quais originalmente processados em formato matricial, precisam ser reconduzidos a essa mesma base de setores, o que é feito por meio da estatística zonal ao final de cada critério, garantindo que os três componentes convirjam para uma unidade geométrica comum antes de qualquer integração.

Todo o processamento espacial foi conduzido no Sistema de Informação Geográfica QGIS, versão 3.40.9, apoiado por dois complementos empregados em etapas específicas do trabalho. O complemento GRASS foi utilizado na extração da rede de drenagem urbana a partir do Modelo Digital de Terreno, operação que

fundamenta os critérios de proximidade à drenagem do componente Suscetibilidade. O complemento dzetsaka foi utilizado na classificação supervisionada do uso e cobertura do solo, por meio do algoritmo Random Forest.

A forma de processamento variou conforme a natureza do dado que constitui cada componente. A Suscetibilidade deriva de variáveis físicas de natureza contínua, como a altitude do terreno, a inclinação da superfície e a distância aos corpos d'água, informações que se expressam adequadamente em formato matricial (raster). Esse componente foi, portanto, processado inteiramente nesse formato, sendo os valores agregados aos setores censitários apenas ao final de cada critério, por estatística zonal.

A Exposição e a Vulnerabilidade, por sua vez, apoiam-se em dados socioeconômicos que o Censo Demográfico já disponibiliza organizados por setor censitário; não havendo ganho analítico em convertê-los para formato matricial, esses componentes foram trabalhados diretamente na tabela de atributos da malha de setores, sem etapa intermediária de rasterização. Essa diferença de tratamento não compromete a integração final, uma vez que todos os critérios convergem para a mesma unidade espacial antes da combinação ponderada.

No interior de cada componente, os critérios selecionados percorrem um mesmo encadeamento de operações, com uma distinção importante em uma de suas etapas. Inicialmente, cada critério é reclassificado em uma escala comum de suscetibilidade, variável de 1 a 5, procedimento que torna comparáveis variáveis originalmente expressas em unidades heterogêneas, como metros, reais ou habitantes por quilômetro quadrado. O método dessa reclassificação não é uniforme.

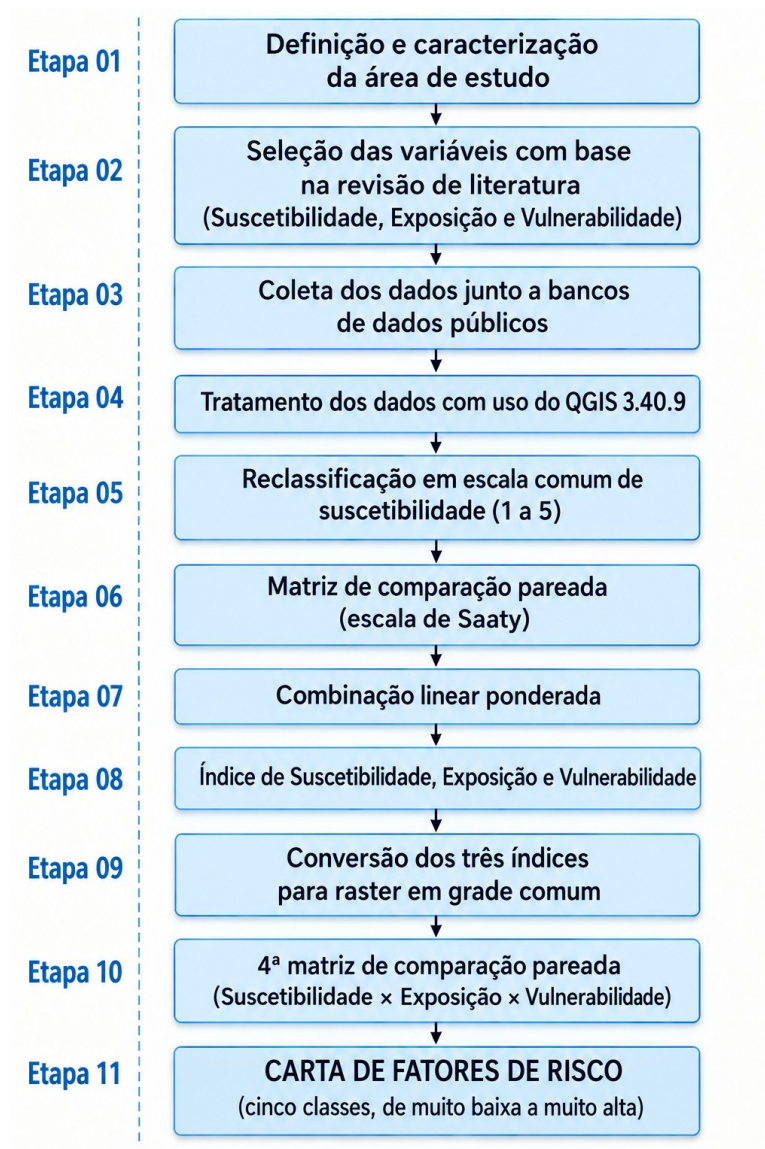
Crítérios para os quais a literatura oferece classificações consagradas, como no caso das variáveis físicas do componente Suscetibilidade, seguem essas classificações; Já critérios derivados de dados locais, sem classificação consagrada (caso dos critérios socioeconômicos), têm o método definido em função da distribuição real dos valores observados, de modo que os intervalos de classe reflitam a estrutura efetiva dos dados.

Concluída a reclassificação, os critérios de cada componente são comparados dois a dois por meio de uma matriz de comparação pareada, da qual se obtêm os pesos relativos de cada critério. A consistência de cada matriz é verificada pela Razão de Consistência, cujo fundamento e limite de aceitação são apresentados no referencial teórico; apenas após essa verificação os pesos são

aplicados sobre os critérios reclassificados, por combinação linear ponderada, resultando no índice parcial do componente.

Esse encadeamento (reclassificação, comparação pareada, verificação de consistência e combinação linear ponderada), é repetido de forma independente para a Suscetibilidade, para a Exposição e para a Vulnerabilidade, e uma quarta vez para integrar os três índices parciais na carta de fatores de risco final. A Figura 20 – Fluxograma síntese do percurso metodológico, sintetiza o percurso completo, desde os critérios de entrada de cada componente até a carta de fatores de risco, com destaque para a etapa de verificação de consistência que antecede cada ponderação.

Figura 20 – Fluxograma síntese do percurso metodológico



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Contudo, cabe registrar um procedimento comum a todas as etapas descritas. A totalidade dos dados vetoriais e matriciais empregados foi padronizada no sistema de referência SIRGAS 2000/UTM Zona 23S (EPSG:31983), datum oficial adotado pelo Sistema Cartográfico Nacional e adequado à posição do estado do Piauí. Essa padronização constitui condição necessária ao próprio método, e não simples recomendação de boa prática cartográfica. As operações métricas que sustentam a análise, como o cálculo de distâncias euclidianas, a estatística zonal e a mensuração de áreas, exigem um sistema de coordenadas projetado, expresso em metros. Realizá-las sobre coordenadas geográficas, medidas em graus decimais, distorceria essas grandezas e poderia produzir resultados espacialmente inconsistentes entre as diferentes camadas de dados.

3.3 MATERIAIS E FONTES DE DADOS

Os dados utilizados neste trabalho provêm de duas origens principais, ambas de caráter oficial: a base cartográfica municipal de União – PI, da qual derivam os insumos físicos e cartográficos, e o Censo Demográfico 2022 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), do qual derivam os dados demográficos e socioeconômicos.

A base cartográfica municipal tem origem no levantamento aerofotogramétrico realizado sobre a zona urbana de União no ano de 2022, com o emprego de Aeronave Remotamente Pilotada (RPA). Esse levantamento gerou um conjunto amplo de produtos cartográficos, entre os quais arquivos vetoriais de quadras, lotes, edificações e tipologia das vias, além de modelos matriciais de elevação e de terreno. Do conjunto, o presente trabalho utiliza como insumo bruto a ortofoto, o Modelo Digital de Terreno e a camada vetorial de edificações. As edificações foram obtidas já vetorizadas a partir da própria base municipal e são empregadas no critério de Taxa de Ocupação Construída, integrante do componente Exposição. Os equipamentos urbanos sensíveis constituem exceção a essa origem, pois não integram a base cartográfica municipal e foram objeto de levantamento próprio do autor, realizado por identificação e fotointerpretação sobre a ortofoto.

O Modelo Digital de Terreno (MDT) registra a altura de todos os elementos presentes sobre o terreno, representando a superfície do solo nu, desprovida da interferência de vegetação, edificações ou quaisquer objetos sobrepostos. Essa

característica é decisiva para o estudo do escoamento superficial, cujo comportamento depende da topografia real do terreno, e não da altura dos objetos que sobre ele se assentam. Neste trabalho, o MDT foi utilizado na resolução espacial de 1 metro, no sistema de referência SIRGAS 2000/UTM Zona 23S. Anteriormente à sua aplicação nos critérios espaciais, o dado já havia sido reprojetado para esse sistema, submetido ao preenchimento de depressões espúrias e recortado aos limites da área de estudo, com os valores externos a essa extensão marcados como NoData, condição necessária ao correto processamento hidrológico posterior.

A opção por um levantamento aerofotogramétrico de escala municipal, em detrimento de modelos digitais de elevação de acesso público, decorre da exigência de discriminação espacial fina que uma análise intraurbana impõe. Modelos globais como o Copernicus DEM apresentam resolução nominal aproximada de 30 metros, adequada a estudos regionais, mas insuficiente para a escala deste trabalho. Em uma área de estudo de aproximadamente 8,8 km², um pixel de 30 metros generalizaria as feições topográficas em uma escala incompatível com a distinção entre quadras, lotes ou trechos de rua adjacentes, justamente as unidades que a análise procura diferenciar. Por essa razão, quando utilizado, o Copernicus DEM cumpre neste estudo apenas a função de composição de mapas de contexto na caracterização geral do município, não constituindo insumo de nenhum critério do componente Suscetibilidade.

Os dados demográficos e socioeconômicos têm origem no Censo Demográfico 2022 do IBGE, estruturados em dois produtos complementares. O primeiro é a malha de setores censitários urbanos, unidade espacial vetorial mínima de divulgação dos dados censitários, que funciona como base geométrica de todo o trabalho. É sobre ela que se agregam os critérios de Exposição e de Vulnerabilidade e é ela que, no componente Suscetibilidade, recebe os valores extraídos por estatística zonal.

O segundo é o produto Agregados por Setores Censitários, disponibilizado pelo IBGE em módulos temáticos, dos quais o trabalho utiliza quatro. Do módulo básico provêm a contagem de pessoas e de domicílios e a média de moradores por domicílio, que fundamentam a densidade populacional, no componente Exposição, e a densidade domiciliar, no componente Vulnerabilidade. O módulo de rendimento do responsável pelo domicílio fornece a variável de renda. O módulo de alfabetização,

referente à população de quinze anos ou mais, embasa o critério de escolaridade. O módulo de demografia, por fim, disponibiliza a estrutura etária da população por setor, insumo indispensável ao cálculo da população em faixas etárias dependentes. Cada módulo é retomado, com o detalhamento das variáveis específicas utilizadas, na seção do critério a que corresponde.

A adoção exclusiva de fontes oficiais, responde a dois requisitos de confiabilidade da pesquisa, que são: a rastreabilidade metodológica, pois ambas as fontes documentam publicamente seus procedimentos de coleta e de processamento, o que assegura a possibilidade de auditoria e a reprodutibilidade dos resultados por terceiros; a compatibilidade de escala com a unidade espacial de análise adotada (setor censitário), visto que bases alternativas de dados socioeconômicos, como estimativas amostrais ou levantamentos de origem privada, não oferecem cobertura sistemática e comparável no nível de granularidade que uma análise intraurbana requer. O Quadro 3 – Dados brutos utilizados na pesquisa, reúne os dados utilizados, com a indicação de suas fontes, anos, formatos e respectivas aplicações na pesquisa.

Quadro 3 – Dados brutos utilizados na pesquisa

Dado	Fonte	Ano	Formato / Resolução	Aplicação na pesquisa
Modelo Digital de Terreno (MDT)	Base cartográfica municipal	2022	Raster, 1 m; EPSG:31983	Altimetria, declividade e extração da rede de drenagem (Suscetibilidade)
Ortofoto	Base cartográfica municipal	2022	Raster	Classificação do uso e cobertura do solo (Suscetibilidade); fotointerpretação dos equipamentos sensíveis (Exposição)
Camada vetorial de edificações	Base cartográfica municipal	2022	Vetorial	Taxa de ocupação construída (Exposição)
Malha de setores censitários urbanos	IBGE (Censo Demográfico)	2022	Vetorial	Unidade espacial de análise e base de agregação de todos os critérios
Agregados por Setores - módulo básico	IBGE (Censo Demográfico)	2022	Tabular, por setor	Densidade populacional e densidade domiciliar (Exposição e Vulnerabilidade)
Agregados por Setores - rendimento do responsável	IBGE (Censo Demográfico)	2022	Tabular, por setor	Renda (Vulnerabilidade)
Agregados por Setores - alfabetização	IBGE (Censo Demográfico)	2022	Tabular, por setor	Escolaridade (Vulnerabilidade)
Agregados por Setores - demografia (estrutura etária)	IBGE (Censo Demográfico)	2022	Tabular, por setor	População em faixas etárias dependentes (Vulnerabilidade)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.4 COMPONENTE SUSCETIBILIDADE

O componente Suscetibilidade expressa a predisposição física do território à

ocorrência de alagamentos e inundações, a capacidade de cada porção da área de estudo a ser atingida pelo fenômeno, independentemente de haver ali população ou bens expostos. Ele reúne cinco critérios: altimetria, declividade, proximidade à drenagem secundária, proximidade ao Rio Parnaíba, e uso e cobertura do solo.

Os quatro primeiros descrevem condicionantes do meio físico, o relevo e a rede hídrica, enquanto o último incorpora o efeito da ocupação humana sobre a capacidade de infiltração e escoamento da superfície. A escolha desses cinco critérios apoia-se em sua recorrência na literatura de mapeamento de suscetibilidade a inundações por análise multicritério, na qual declividade, altimetria, proximidade à drenagem e uso do solo figuram entre as variáveis mais frequentemente empregadas.

A Suscetibilidade constitui apenas um dos três termos dos fatores de risco, onde por si só, um valor alto de predisposição física não implica risco elevado, caso a área correspondente não abrigue população ou infraestrutura (Exposição) e não atinja grupos de baixa capacidade de resposta (Vulnerabilidade). O componente é tratado de forma isolada precisamente para que a distinção conceitual já desenvolvida entre alagamento, inundação e enxurrada permaneça rastreável até a etapa de integração final, evitando que a origem física do risco se dilua em um indicador único e pouco interpretável.

Todos os critérios físicos derivam do Modelo Digital de Terreno, processados em formato matricial e depois agregados aos setores. Vale ressaltar que foram utilizadas nesta pesquisa, duas as imagens aerofotogramétricas, uma da zona urbana consolidada e outra do bairro Areias (que fica um pouco mais afastado do núcleo urbano), ambas com voos aerofotogramétricos próprios. Por isso, os cinco critérios foram processados como rasters separados em toda a cadeia de operações, unificados apenas na tabela de atributos dos setores censitários, por meio de uma expressão condicional que atribui a cada setor o valor da porção que efetivamente o cobre.

Antes do cálculo dos critérios propriamente ditos, o Modelo Digital de Terreno passou por uma etapa de preparação hidrológica. Além da reprojeção, do recorte e da marcação de NoData já descritos, o modelo foi submetido ao preenchimento de depressões espúrias, etapa que elimina cavidades artificiais capazes de interromper o escoamento simulado e que o torna apto ao processamento hidrológico seguinte.

Sobre esse modelo preparado, a rede de drenagem urbana foi extraída pela

ferramenta *r.watershed*, do complemento GRASS integrado ao QGIS, seguindo a sequência clássica de derivação de redes de drenagem a partir de modelos digitais de elevação: direção de fluxo, acúmulo de fluxo e extração da rede a partir de um limiar de área de contribuição.

3.4.1 Altimetria

A altimetria relaciona a cota do terreno à suscetibilidade ao acúmulo de água, onde as porções mais baixas do relevo tendem a concentrar o escoamento superficial e a reter água por mais tempo, enquanto as cotas mais elevadas drenam com maior facilidade.

Trata-se, em essência, de uma leitura hipsométrica do terreno, procedimento clássico da análise geomorfológica de bacias hidrográficas, aqui adaptado à escala do lote e do setor censitário. Em uma área praticamente plana, como a zona urbana de União, com altitudes entre aproximadamente 43 e 100 metros, essa relação é sutil, mas não desprezível, pois pequenas diferenças de cota bastam para orientar o caminho preferencial das águas.

O critério foi obtido pela reclassificação direta do MDT em cinco classes de suscetibilidade, definidas por intervalos altimétricos iguais, com a suscetibilidade máxima atribuída às cotas mais baixas e a mínima às mais altas. A opção por intervalos iguais, e não por quebras naturais, decorre diretamente da arquitetura de duas porções já descritas: apenas limiares fixos garantem que os valores do núcleo urbano e do bairro Areias permaneçam na mesma escala de referência quando as duas porções, processadas como rasters distintos, forem unificadas na tabela de setores. As faixas altimétricas foram reclassificadas conforme a Tabela 2 – Classes de suscetibilidade por Altimetria.

Tabela 2 – Classes de suscetibilidade por Altimetria

Faixa altimétrica	Classe de suscetibilidade
40 – 52 m	5
52 – 64 m	4
64 – 76 m	3
76 – 88 m	2
88 – 100 m	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.4.2 Declividade

A declividade complementa a altimetria ao descrever não a cota absoluta, mas a inclinação da superfície, que governa a velocidade do escoamento. O fundamento hidrológico dessa relação remonta ao conceito clássico de escoamento superficial por excesso de infiltração, segundo o qual a velocidade com que a água se desloca sobre o terreno cresce com a declividade, reduzindo o tempo disponível para infiltração (Horton, 1933).

Terrenos planos escoam a água lentamente e favorecem seu acúmulo, elevando a suscetibilidade ao alagamento. Já terrenos mais inclinados escoam com rapidez e a reduzem localmente. Por isso, atribuiu-se a suscetibilidade máxima às menores declividades, na mesma lógica adotada para a altimetria.

O critério foi derivado do MDT pelo algoritmo de declividade do QGIS/GDAL, com a saída expressa em porcentagem. A reclassificação em cinco classes seguiu a classificação de relevo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, (EMBRAPA, 1979). As classes de relevo foram reclassificadas conforme Tabela 3 – Classes de suscetibilidade por Declividade.

Tabela 3 – Classes de suscetibilidade por Declividade

Classe de relevo (EMBRAPA, 1979)	Classe de suscetibilidade
Plano (0 – 3%)	5
Suave Ondulado (3 – 8%)	4
Ondulado (8 – 20%)	3
Forte Ondulado (20 – 45%)	2
Montanhoso e Escarpado (> 45%)	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Como nos demais critérios físicos, o núcleo urbano e o bairro Areias foram reclassificados pela mesma tabela e unificados posteriormente na tabela de atributos dos setores.

3.4.3 Proximidade à Drenagem Secundária

A proximidade à rede de drenagem secundária, os canais e talvegues urbanos que conduzem o escoamento antes de alcançar o rio principal, expressa a suscetibilidade ao alagamento por transbordamento dessa rede em episódios de chuva intensa, pois quanto mais próximo de um canal de drenagem, maior a exposição ao extravasamento e ao acúmulo de água.

A distância euclidiana até o canal mais próximo funciona, neste critério, como variável substituta de fatores mais difíceis de mensurar diretamente na escala deste trabalho, como o tempo de concentração do escoamento e a frequência de extravasamento observada em cada trecho, uso corrente na literatura de suscetibilidade a inundações diante da escassez de séries hidrológicas locais detalhadas. O critério parte da rede extraída do MDT.

Sobre essa rede, calculou-se a distância euclidiana de cada célula do território ao canal mais próximo, pela ferramenta de proximidade do QGIS. O raster de distância resultante foi reclassificado segundo os limiares propostos por Pessoa Neto *et al.* (2024), para a suscetibilidade a inundações na bacia do rio Duas Unas, em Pernambuco. Conforme a Tabela 4 – Classes de suscetibilidade por Proximidade à Drenagem Secundária, que reescala linearmente as notas originais dos autores (1 a 10), para a escala comum de 1 a 5 adotada neste trabalho. A classe 4 não é alcançada por essa conversão, consequência determinística do reescalonamento

das quatro notas originais do artigo, não omissão arbitrária.

Tabela 4 – Classes de suscetibilidade por Proximidade à Drenagem Secundária

Distância ao canal mais próximo	Classe de suscetibilidade
até 100 m	5
100 – 300 m	3
300 – 500 m	2
acima de 500 m	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.4.4 Proximidade ao Rio Parnaíba

A proximidade ao rio Parnaíba foi tratada como critério autônomo, distinto da proximidade à drenagem secundária, por uma razão conceitual, não só técnica, que retoma a diferenciação terminológica já estabelecida entre esses conceitos. A rede secundária relaciona-se ao alagamento, o acúmulo de água por insuficiência da drenagem urbana. O rio principal relaciona-se à inundação propriamente dita, com o extravasamento do curso d'água para além do seu leito menor, fenômeno de dinâmica, magnitude e histórico distintos. Reuni-los em um único critério, impediria diferenciar, na carta final, o risco de alagamento do risco de inundação ribeirinha.

O rio Parnaíba percorre o limite oeste da área de estudo, na fronteira entre os estados do Piauí e do Maranhão. A partir da representação vetorial de sua margem, calculou-se a distância euclidiana de cada célula ao rio, do mesmo modo empregado para a drenagem secundária.

Não há, na literatura consultada, tabela de classificação específica para a distância isolada a um rio principal de grande porte, lacuna confirmada em revisão bibliográfica dedicada a essa busca. Por isso, adotou-se também aqui a mesma tabela de Pessoa Neto *et al.* (2024), já apresentada na Tabela 4 – Classes de suscetibilidade por Proximidade à Drenagem Secundária, pela coerência interna com o critério de drenagem secundária e pela compatibilidade de escala com a área de estudo.

3.4.5 Uso e Cobertura do Solo

O uso e cobertura do solo é o único critério da Suscetibilidade que incorpora o efeito da ocupação humana sobre o comportamento hidrológico da superfície, onde superfícies impermeabilizadas, vias pavimentadas e áreas construídas, reduzem a infiltração e ampliam o volume e a velocidade do escoamento, elevando a suscetibilidade. Entretanto superfícies vegetadas favorecem a infiltração e a atenuam.

A impermeabilização do solo altera diretamente o coeficiente de escoamento superficial da bacia, reduzindo o tempo de concentração e ampliando os picos de cheia a jusante (Tucci, 2008). O critério exige, portanto, a identificação prévia das classes de cobertura presentes na área de estudo, obtida por classificação da ortofoto municipal já apresentada.

Adotou-se a classificação supervisionada pixel a pixel pelo algoritmo Random Forest, por meio do complemento dzetsaka, na resolução de 1 metro. O núcleo urbano e o bairro Areias foram classificados separadamente, em razão das diferenças radiométricas entre os dois voos aerofotogramétricos e da composição de bandas distinta entre os mosaicos, condições que desaconselham a união prévia em mosaicos das ortofotos. Definiram-se cinco classes de cobertura: vegetação, solo exposto, superfície pavimentada, área construída e água. Em seguida procedeu-se à reclassificação em suscetibilidade, conforme a Tabela 5 – Classes de suscetibilidade por Uso e Cobertura do Solo.

Tabela 5 – Classes de suscetibilidade por Uso e Cobertura do Solo

Classe de cobertura	Classe de suscetibilidade
Vegetação	1
Solo exposto	4
Superfície pavimentada	5
Área construída	5
Água	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

É importante ressaltar que o critério solo exposto soa, intuitivamente, mais próximo de vegetação do que de superfície impermeável. Em ambiente urbano, porém, o solo descoberto costuma estar compactado pelo pisoteio e pela circulação, e sujeito ao selamento superficial provocado pelo impacto direto da chuva,

condições que reduzem sua capacidade real de infiltração a níveis comparáveis aos de superfícies parcialmente impermeáveis. A ausência de cobertura vegetal, além disso, elimina a interceptação da precipitação e favorece o transporte de sedimentos, que tende a obstruir a microdrenagem a jusante, segundo o método da Curve Number (USDA-SCS, 1986), que atribui a solos expostos valores de CN entre 77 e 94, próximos aos de superfícies impermeabilizadas. Por essas razões, o solo exposto recebe suscetibilidade próxima à das superfícies impermeabilizadas, não à da vegetação.

O uso e cobertura do solo também é um critério físico da Suscetibilidade sujeito a mudança ao longo do tempo por ação humana, com isso, as políticas de planejamento urbano podem atuar diretamente, por meio do controle da impermeabilização e da preservação de áreas vegetadas.

Logo abaixo, o Quadro 4 – Síntese dos critérios do componente Suscetibilidade, sintetiza os critérios que compõem este componente, relacionando para cada um a fonte dos dados, o procedimento de obtenção e o significado atribuído à suscetibilidade a alagamento e à inundação.

Quadro 4 – Síntese dos critérios do componente Suscetibilidade

Critério	Fonte dos dados	Como foi obtido	O que expressa?
Altimetria	Modelo Digital de Terreno (2022)	Reclassificação hipsométrica em intervalos iguais de 12 m	Áreas mais baixas acumulam água com mais facilidade, elevando a suscetibilidade
Declividade	Modelo Digital de Terreno (2022)	Cálculo da inclinação em % e reclassificação segundo a EMBRAPA (1979)	Terrenos mais planos escoam a água lentamente, elevando a suscetibilidade
Proximidade à drenagem secundária	Rede de drenagem extraída do MDT (r.watershed)	Distância euclidiana à rede e reclassificação (Pessoa Neto <i>et al.</i> , 2024)	A proximidade a canais urbanos eleva a suscetibilidade ao alagamento
Proximidade ao rio Parnaíba	Representação vetorial da margem do rio	Distância euclidiana à margem e reclassificação (Pessoa Neto <i>et al.</i> , 2024)	A proximidade ao rio eleva a suscetibilidade à inundação por extravasamento
Uso e cobertura do solo	Ortofoto (2022)	Classificação supervisionada (Random Forest) e reclassificação em suscetibilidade	Superfícies impermeáveis ampliam o escoamento; a vegetação o atenua

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.5 COMPONENTE EXPOSIÇÃO

A Exposição é o termo do risco que responde à pergunta sobre o que está sujeito ao fenômeno, ou seja, a presença de pessoas, edificações e serviços nas áreas que o componente Suscetibilidade identificou como fisicamente predispostos a alagamentos e inundações. Um setor censitário pode reunir condições físicas altamente favoráveis à ocorrência do fenômeno sem que isso, por si só, configure um problema relevante para o planejamento urbano, caso ali não haja população, patrimônio edificado ou infraestrutura que venham a ser efetivamente afetados. É essa lacuna que o componente Exposição preenche.

O componente reúne três critérios, cada um voltado a uma dimensão distinta daquilo que pode ser atingido: a densidade populacional, que expressa a quantidade de pessoas potencialmente afetadas; a taxa de ocupação construída, que expressa a concentração de patrimônio edificado; e os equipamentos urbanos sensíveis, que expressam a presença de serviços e infraestruturas cuja interrupção ou dano têm

repercussão que extrapola o próprio ponto atingido. Os três critérios são complementares, não substituíveis entre si. Um setor densamente povoado não é necessariamente o mais ocupado por edificações, e um setor com poucos equipamentos sensíveis pode, ainda assim, concentrar grande contingente populacional. Reunidos, os três critérios compõem um retrato mais completo do que está exposto do que qualquer um deles tomado isoladamente.

Diferentemente do componente Suscetibilidade, cujos critérios físicos exigiram processamento matricial e agregação posterior por estatística zonal, o componente Exposição foi processado inteiramente em formato tabular, diretamente na malha de setores censitários, sem etapa intermediária de rasterização, como já indicado anteriormente.

Essa diferença de tratamento decorre da própria natureza dos dados, pois os três critérios partem de informações que já chegam agregadas, ou passíveis de agregação direta, à escala do setor censitário, seja pelo Censo Demográfico, pela base cartográfica municipal ou pelo levantamento do próprio autor, não havendo, portanto, ganho analítico em convertê-los para raster antes de reconduzi-los à mesma unidade.

Como em todos os critérios deste trabalho, cada um dos três foi reclassificado em uma escala comum de suscetibilidade de 1 a 5. Por se tratar de variáveis derivadas de dados locais, o método de reclassificação de cada um foi definido pela distribuição real dos valores observados. A forma dessa definição variou conforme o que os dados exigiram, logo na densidade populacional, compararam-se métodos candidatos pela medida de qualidade do ajuste de variância, que aponta o método capaz de produzir classes mais homogêneas internamente e mais distintas entre si para os dados efetivamente coletados nesta bacia urbana.

Já na taxa de ocupação construída, a própria forma assimétrica da distribuição indicou diretamente o método adequado; nos equipamentos urbanos sensíveis, a estrutura dos dados, marcada pela ausência de equipamentos em parte dos setores, impôs o tratamento próprio que se detalha adiante.

A densidade populacional é critério amplamente empregado em estudos de exposição a inundações, por traduzir de forma direta o contingente humano sob risco. Já a taxa de ocupação construída e os equipamentos urbanos sensíveis, tratados aqui como critérios ponderados dentro de uma estrutura AHP, encontram precedente em Moreira *et al.* (2023), que empregou a densidade de edificações

como critério de exposição em sua matriz multicritério.

3.5.1 Densidade Populacional

A densidade populacional é obtida pela razão entre a população total e a área de cada setor censitário, com os dados de população extraídos do módulo básico do Censo Demográfico de 2022. O critério expressa uma relação direta, onde, quanto maior o número de pessoas por unidade de área, maior o contingente de indivíduos potencialmente sujeito a um mesmo evento de alagamento ou inundação, o que justifica sua suscetibilidade crescente com o adensamento populacional.

Entre os métodos de reclassificação avaliados, optou-se pelo de Quebras Naturais, proposto por Jenks (1967), que agrupa os valores de uma variável em classes de máxima semelhança interna e máxima diferença entre si. Diferente de intervalos fixos, o método localiza os saltos já existentes na distribuição dos dados e os transforma em limites de classe. A divisão escolhida é a de melhor ajuste, medido pelo indicador Goodness of Variance Fit (GVF), do mesmo autor, em que valores próximos de 1 indicam classes homogêneas e bem distintas entre si, e próximos de 0 indicam ajuste ruim. Aqui, o procedimento classificou as variáveis socioeconômicas da Vulnerabilidade, caso da densidade populacional e do percentual de população em faixas etárias dependentes, testando diferentes números de classes até chegar à de maior GVF.

Para densidade populacional, o método de Quebras Naturais (Jenks) obteve o índice de ajuste mais alto (GVF = 0,9385), o que orientou sua escolha para este critério. A Tabela 6 – Classes de suscetibilidade por Densidade Populacional sintetiza as faixas de corte correspondentes.

Tabela 6 – Classes de suscetibilidade por Densidade Populacional

Densidade populacional (hab./km ²)	Classe de suscetibilidade
< 1.521,10	1
1.521,10 – 3.274,40	2
3.274,40 – 4.701,79	3
4.701,79 – 6.069,84	4
> 6.069,84	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.5.2 Taxa de Ocupação Construída

A taxa de ocupação construída parte da camada vetorial de edificações da área de estudo, extraída da base cartográfica municipal de 2022, único levantamento cartográfico disponível para a cidade de União até o momento. Sobre essa camada, procedeu-se à interseção das edificações com a malha de setores censitários, operação necessária para que uma edificação cortada pelo limite entre dois setores seja corretamente repartida entre eles, evitando a dupla contagem de sua área em ambos. Após a interseção, as áreas dos fragmentos resultantes foram recalculadas e somadas por setor, obtendo-se a área construída total de cada unidade.

O critério corresponde à razão entre essa área construída e a área total do setor, uma grandeza adimensional, compreendida entre 0 e 1. Trata-se, em termos conceituais, de grandeza análoga à taxa de ocupação empregada como parâmetro urbanístico municipal, a razão entre a área construída e a área do lote, aqui transposta da escala do lote para a escala do setor censitário. O critério expressa a concentração de patrimônio edificado exposto, ou seja, setores com maior proporção de sua área ocupada por construções concentram, proporcionalmente, mais bens sujeitos a dano em caso de alagamento ou inundação.

Neste critério, o método de classificação foi definido pela mesma comparação estatística aplicada aos demais critérios do trabalho. Testaram-se os métodos de Quantil, Intervalo Igual e Quebras Naturais (Jenks), avaliando-se cada um pela medida de qualidade do ajuste de variância (GVF). As Quebras Naturais apresentaram o melhor ajuste (GVF de 0,9554), à frente do Intervalo Igual (0,9538) e

do Quantil (0,9343), e foram adotadas, mantendo a coerência metodológica com os demais critérios do trabalho. A Tabela 7 – Classes de suscetibilidade por Taxa de Ocupação Construída, apresenta as faixas resultantes.

Tabela 7 – Classes de suscetibilidade por Taxa de Ocupação Construída

Taxa de ocupação construída	Classe de suscetibilidade
< 0,0865	1
0,0865 – 0,1581	2
0,1581 – 0,2220	3
0,2220 – 0,2808	4
> 0,2808	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.5.3 Equipamentos Urbanos Sensíveis

Os equipamentos urbanos sensíveis resultam de levantamento próprio do autor, realizado por identificação e fotointerpretação sobre a ortofoto da área de estudo. Foram mapeadas oito categorias de equipamentos: escola, creche, unidade básica de saúde, hospital, Centro de Referência de Assistência Social (CRAS), prefeitura, igreja e delegacia, totalizando 65 pontos identificados na área urbana de União.

A composição dessa lista fundamenta-se em três razões que, isoladas ou combinadas, justificam a inclusão de cada categoria. São elas o atendimento a parcelas da população em condição de maior vulnerabilidade, a concentração de afluência de público e a integração à infraestrutura crítica de resposta a emergências. A inclusão de igrejas nessa lista justifica-se pela aglomeração periódica de público que esses equipamentos concentram, incluindo pessoas com mobilidade reduzida, cuja capacidade de deslocamento rápido diante de um evento de alagamento é, via de regra, mais limitada.

O critério corresponde à densidade de equipamentos sensíveis por área do setor, obtida pela contagem de pontos localizados dentro de cada polígono de setor, dividida pela área desse polígono. Não foi aplicada ponderação por tipo de equipamento, logo, a presença de um hospital e a de uma igreja, por exemplo,

contam igualmente para a densidade do setor, decisão que trata a presença de qualquer equipamento sensível, independentemente de sua categoria, como igualmente relevante para a exposição do setor.

A reclassificação combinou dois procedimentos, onde, os setores sem qualquer equipamento sensível foram isolados em uma classe própria, a classe 1, e o método de Quebras Naturais foi aplicado apenas ao subconjunto de setores com densidade positiva, tratamento que evita reduzir a ausência de equipamentos a um grau ínfimo de presença dentro de uma mesma escala contínua (a ausência de equipamentos sensíveis é uma condição distinta, não um grau menor de presença).

As faixas de corte assim obtidas compõem Tabela 8 – Classes de suscetibilidade por Equipamentos Urbanos Sensíveis.

Tabela 8 – Classes de suscetibilidade por Equipamentos Urbanos Sensíveis

Equipamentos sensíveis (equip./km²)	Classe de suscetibilidade
0 (ausência)	1
0,637 – 9,429	2
9,429 – 20,050	3
20,050 – 31,641	4
31,641 – 64,535	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O Quadro 5 – Síntese dos critérios do componente Exposição, sintetiza os critérios que compõem o componente Exposição, relacionando para cada um a fonte dos dados, o procedimento de obtenção e o significado atribuído à suscetibilidade a alagamento e à inundação.

Quadro 5 – Síntese dos critérios do componente Exposição

Critério	Fonte dos dados	Como foi obtido	O que expressa?
Densidade Populacional	Censo Demográfico (2022), módulo básico	Razão entre a população total e a área de cada setor censitário	Quanto mais pessoas por área, maior o contingente sujeito ao mesmo evento
Taxa de Ocupação Construída	Camada de edificações da base cartográfica municipal	Interseção das edificações com os setores, soma da área construída e razão sobre a área do setor	Maior concentração de patrimônio edificado exposto
Equipamentos Urbanos Sensíveis	Levantamento próprio do autor por fotointerpretação da ortofoto	Contagem de equipamentos por setor dividida pela área do setor	Maior presença de serviços e infraestrutura crítica expostos

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.6 COMPONENTE VULNERABILIDADE

A Vulnerabilidade é o terceiro termo do risco, e o único centrado inteiramente na população, não no território ou nos bens que ele abriga. Ela expressa a capacidade diferenciada de cada grupo social de resistir aos efeitos de um alagamento ou de uma inundação e de se recuperar deles. Onde a Exposição responde a quem e o que está no caminho do fenômeno, a Vulnerabilidade qualifica essa mesma população exposta, distinguindo, entre os setores igualmente atingidos, aqueles cujos moradores dispõem de menos recursos, informação ou margem de manobra para reagir. Um evento de mesma magnitude física produz, por isso, consequências desiguais conforme o perfil social do setor em que ocorre, e é essa desigualdade que este componente torna visível.

O componente reúne quatro critérios, todos extraídos do Censo Demográfico

de 2022 (IBGE, 2022) e organizados por setor censitário: a renda, a densidade domiciliar, a escolaridade e o percentual de população em faixas etárias dependentes. Os quatro descrevem dimensões consolidadas na literatura de vulnerabilidade social a desastres, capacidade econômica, adensamento habitacional, acesso à informação e autonomia física de resposta, e sua combinação busca captar, de forma mais completa do que qualquer indicador isolado, a heterogeneidade social da área de estudo.

Como nos demais componentes, cada um dos quatro critérios foi reclassificado em uma escala comum de suscetibilidade de 1 a 5. Por se tratar, como os critérios de Exposição, de variáveis derivadas de dados locais sem classificação consagrada na literatura, à diferença dos critérios físicos de Suscetibilidade, o método de corte de cada um foi definido pela distribuição real dos valores observados, avaliada pela medida de qualidade do ajuste de variância (GVF). Nos quatro critérios da Vulnerabilidade, esse método venceu por Quebras Naturais de Jenks, ainda que por margens distintas em cada caso, como se detalha a seguir.

3.6.1 Renda

A renda mede a capacidade econômica da população de absorver perdas e de custear sua própria recuperação após um evento de alagamento ou inundação, pois quanto menor a renda, menor a margem financeira para repor bens danificados, custear reparos ou buscar realocação temporária, e maior, portanto, a vulnerabilidade. O critério tem origem no módulo de rendimento do responsável pelo domicílio do Censo 2022 (IBGE, 2022).

A renda é o único critério deste componente com direção invertida, onde diferentemente dos demais, nos quais o aumento do valor observado eleva a suscetibilidade, aqui é a renda mais baixa que corresponde à classe de maior vulnerabilidade. A inversão decorre da própria natureza do indicador, que não intensifica fisicamente o fenômeno, como ocorre no componente Suscetibilidade, mas expressa uma condição social que reduz a capacidade de resposta a ele.

O histograma dos 45 valores de renda revela um salto real e isolado entre R\$ 2.143,61 e R\$ 2.978,78, de R\$ 835, mais de cinco vezes qualquer outro intervalo entre valores vizinhos da série, cujo segundo maior salto não ultrapassa R\$ 157. Esse salto isola os três setores de maior renda do restante da distribuição, indicando

um agrupamento natural, não um artefato do método de classificação.

Comparados os métodos candidatos, as Quebras Naturais de Jenks renderam o melhor ajuste ($GVF = 0,9703$, contra $0,8133$ do Quantil). o Intervalo Igual foi descartado por produzir uma classe vazia. As faixas de corte, com a direção invertida já mencionada, é apresenta na Tabela 9 – Classes de Vulnerabilidade por Renda

Tabela 9 – Classes de Vulnerabilidade por Renda

Faixa de renda (R\$)	Classe de vulnerabilidade
797,15 – 1.090,28	5
1.090,28 – 1.372,65	4
1.372,65 – 1.763,50	3
1.763,50 – 2.143,61	2
2.143,61 – 3.107,87	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Não existe, na literatura, limiar monetário universal para renda: trata-se de variável local, dependente da moeda e do contexto econômico da área de estudo, o que torna necessário derivar os cortes da própria distribuição observada.

3.6.2 Densidade Domiciliar

A densidade domiciliar expressa o número médio de moradores por domicílio em cada setor, obtido diretamente do módulo básico do Censo 2022 (IBGE, 2022). Domicílios mais adensados concentram mais pessoas expostas às mesmas condições de risco e, em situações de evacuação, enfrentam maior dificuldade logística para se deslocar e se reorganizar rapidamente. A direção deste critério é, portanto, direta: quanto maior a densidade domiciliar, maior a vulnerabilidade.

Testados os quatro métodos, o de Quebras Naturais de Jenks novamente se impôs, com GVF de $0,952$, à frente do Intervalo Igual ($0,940$), do Desvio-Padrão ($0,923$) e do Quantil ($0,901$). A Tabela 10 – Classes de Vulnerabilidade por Densidade Domiciliar, apresenta a classificação com as faixas.

Tabela 10 – Classes de Vulnerabilidade por Densidade Domiciliar

Densidade domiciliar (mor./dom.)	Classe de vulnerabilidade
2,9 – 3,0	1
3,0 – 3,2	2
3,2 – 3,4	3
3,4 – 3,6	4
3,6 – 3,9	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.6.3 Escolaridade

A escolaridade relaciona-se à vulnerabilidade por sua influência sobre o acesso à informação de risco, a compreensão de alertas e orientações oficiais e a capacidade de agir preventivamente diante de um evento anunciado, além de refletir a capacidade de resposta e recuperação da população, ao restringir o acesso a emprego, renda e recursos para se reerguer após o impacto (Blaikie *et al.*, 1994). O Censo 2022 (IBGE, 2022), não disponibiliza anos de estudo por setor censitário, por isso, o critério foi operacionalizado como proxy pela taxa de analfabetismo da população de 15 anos ou mais, solução adotada de forma recorrente em estudos de vulnerabilidade social nessa mesma escala de agregação. A direção do critério é direta, ou seja, quanto maior a taxa de analfabetismo, maior a vulnerabilidade.

O padrão se repetiu na Escolaridade: Jenks obteve o maior GVF (0,9459), superando o Intervalo Igual (0,9328), o Quantil (0,9283) e o Desvio-Padrão (0,9148), margem menos pronunciada que a observada na Renda, mas ainda assim decisiva. Os limiares correspondentes estão na Tabela 11 – Classes de Vulnerabilidade por Escolaridade.

Tabela 11 – Classes de Vulnerabilidade por Escolaridade

Taxa de analfabetismo	Classe de vulnerabilidade
6,40% – 9,05%	1
9,05% – 14,29%	2
14,29% – 18,39%	3
18,39% – 25,31%	4
25,31% – 32,91%	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.6.4 Percentual de População em Faixas Etárias Dependentes

O quarto critério mede o percentual de população em faixas etárias dependentes, definido como a proporção de crianças de zero a quatorze anos e de idosos com sessenta anos ou mais em relação à população total de cada setor. Essa denominação é adotada deliberadamente em lugar de razão de dependência, indicador oficial do IBGE que divide esses mesmos grupos pela população em idade potencialmente ativa, de quinze a sessenta e quatro anos, não pela população total.

A fórmula empregada aqui é distinta, e o nome precisa refleti-la com precisão. O critério parte do módulo de demografia do Censo 2022 (IBGE, 2022), que disponibiliza a estrutura etária da população por setor, e sua direção é direta, quanto maior a proporção de população dependente, maior a vulnerabilidade.

A opção pelo corte etário de sessenta anos, e não de sessenta e cinco, decorre de uma limitação de agregação do próprio produto do IBGE, cujas faixas etárias são publicadas em intervalos de dez anos a partir dos sessenta, o que torna o corte de sessenta e cinco anos impossível de reproduzir com exatidão nesse nível de dado. O corte adotado corresponde, por outro lado, à definição legal de idoso do Estatuto da Pessoa Idosa (Lei nº 10.741/2003). Sua adoção, em lugar da convenção internacional de sessenta e cinco anos, é aqui declarada com transparência como adaptação aos dados disponíveis, não como escolha teórica independente.

A escolha de crianças e idosos como grupos de menor autonomia física de resposta a eventos de alagamento e inundação apoia-se em meta-análise de sessenta e sete estudos de caso, que identifica a estrutura etária entre os principais fatores demográficos de vulnerabilidade social a inundações (Rufat *et al.*, 2015), e

em evidência empírica que valida componentes de vulnerabilidade social a partir de desfechos reais de desastre nos Estados Unidos (Tellman *et al.*, 2021).

Também aqui Jenks prevaleceu, embora por margem mínima sobre o Intervalo Igual GVF de 0,9541 contra 0,9537, diferença pequena o suficiente para ser registrada com transparência. O Desvio-Padrão (0,9122) e o Quantil (0,9086) ficaram mais distantes. A Tabela 12 – Classes de vulnerabilidade por Percentual de População em Faixas Etárias Dependentes, sintetiza as faixas resultantes. Como verificação de integridade dos dados de origem, a soma das onze faixas etárias publicadas pelo Censo foi conferida contra a população total declarada, com correspondência exata nos 45 setores.

Tabela 12 – Classes de vulnerabilidade por Percentual de População em Faixas Etárias Dependentes

Pop. em faixas etárias dependentes	Classe de vulnerabilidade
31,419% – 33,067%	1
33,067% – 36,628%	2
36,628% – 38,786%	3
38,786% – 41,398%	4
41,398% – 44,186%	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro 6 – Síntese dos critérios do componente Vulnerabilidade, sintetiza os critérios que compõem o componente Vulnerabilidade, relacionando para cada um a fonte dos dados, o procedimento de obtenção e o significado atribuído à suscetibilidade a alagamento e à inundação.

Quadro 6 – Síntese dos critérios do componente Vulnerabilidade

Critério	Fonte dos dados	Como foi obtido	O que expressa
Renda	Censo Demográfico (2022), rendimento do responsável	Reclassificação por Jenks a partir da distribuição real, direção invertida	Menor renda, menor capacidade de recuperação, maior vulnerabilidade
Densidade Domiciliar	Censo Demográfico (2022), módulo básico	Reclassificação por Jenks a partir da distribuição real	Maior número de moradores por domicílio, maior vulnerabilidade
Escolaridade	Censo Demográfico (2022), módulo de alfabetização	Taxa de analfabetismo reclassificada por Jenks	Maior analfabetismo, menor acesso à informação de risco, maior vulnerabilidade
População em Faixas Etárias Dependentes	Censo Demográfico (2022), módulo de demografia	Percentual de crianças e idosos reclassificado por Jenks	Maior proporção de população dependente, menor autonomia de resposta, maior vulnerabilidade

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.7 APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP

A ponderação relativa entre os critérios de cada componente foi obtida pelo método do Processo de Análise Hierárquica (AHP). Esta seção descreve como o método foi efetivamente aplicado neste trabalho: como as matrizes foram construídas, como os pesos foram calculados a partir delas e como sua consistência foi verificada, antes de cada aplicação concreta quanto a Suscetibilidade, à

Exposição, à Vulnerabilidade e à integração final dos três índices.

Em cada uma das quatro aplicações, os critérios (ou, na etapa final, os índices), já reclassificados foram comparados dois a dois em uma matriz de julgamento, segundo a escala de Saaty, onde, cada célula recebeu o valor correspondente à importância relativa de um elemento sobre o outro, e a célula simétrica recebeu automaticamente o inverso desse valor.

O peso de cada elemento (coluna AV.N) foi obtido pela média geométrica dos valores de sua linha (coluna AV), normalizada pela soma das médias geométricas de todos os elementos da matriz. A consistência dos julgamentos foi verificada, em cada uma das quatro matrizes, pela Razão de Consistência (RC), calculada a partir do autovalor máximo da matriz ($\lambda_{\text{máx}}$, obtido pela multiplicação da soma de cada coluna original pelo vetor de pesos normalizados), do Índice de Consistência ($IC = (\lambda_{\text{máx}} - n)/(n - 1)$) e do Índice Randômico (IR) tabelado por Saaty conforme o tamanho n da matriz, onde 0,58 para $n = 3$, 0,90 para $n = 4$ e 1,12 para $n = 5$. Uma RC de até 0,10 indica julgamentos consistentes; as quatro matrizes construídas neste trabalho atenderam a esse limite, como se detalha a seguir.

Esse mesmo procedimento, da matriz de comparação pareada, cálculo dos pesos pela média geométrica normalizada e verificação da Razão de Consistência, foi repetido de forma independente quatro para a Suscetibilidade, a Exposição, a Vulnerabilidade e para a integração final dos três índices.

3.7.1 Ponderação e Índice de Suscetibilidade

Reclassificados os cinco critérios na escala comum de suscetibilidade, procedeu-se à sua agregação aos setores censitários por estatística zonal, obtendo-se, para cada setor, o valor médio de cada critério. Nessa etapa, os rasters do núcleo urbano e do bairro Areias foram unificados por uma expressão condicional na calculadora de campos, que atribui a cada setor o valor da porção que efetivamente o cobre, recorrendo ao valor das Areias apenas quando o do núcleo está ausente. A ponderação entre os cinco critérios seguiu a matriz de julgamento apresentada na Tabela 13 – Matriz de julgamento par a par do componente Suscetibilidade.

Tabela 13 – Matriz de julgamento par a par do componente Suscetibilidade

Critério	Altimetria	Declividade	Prox. drenagem	Prox. rio	Uso do solo	AV	AV.N
Altimetria	1,00	1,00	2,00	0,50	3,00	1,2457	0,2154
Declividade	1,00	1,00	2,00	0,50	3,00	1,2457	0,2154
Prox. drenagem	0,50	0,50	1,00	0,33	2,00	0,6988	0,1208
Prox. rio	2,00	2,00	3,00	1,00	4,00	2,1689	0,3750
Uso do solo	0,33	0,33	0,50	0,25	1,00	0,4251	0,0735
Soma	4,8333	4,8333	8,50	2,5833	13,00	5,7844	1,0000

$\lambda_{\max} = 5,0329$ $n = 5$ $IC = 0,0082$ $IR = 1,12$ $RC = 0,0073$

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na matriz da Suscetibilidade, a Proximidade ao Rio Parnaíba recebeu o maior peso (0,3750). Entre os cinco critérios físicos, é o mais diretamente associado ao extravasamento do curso d'água, fenômeno de maior magnitude na área de estudo. Altimetria e Declividade dividiram o segundo maior peso (0,2154 cada), tratadas como igualmente relevantes por descreverem, uma pela cota, outra pela inclinação, a mesma condição de acúmulo de água em terrenos baixos e planos. A Proximidade à Drenagem Secundária recebeu peso intermediário (0,1208), por influenciar o alagamento de forma mais pontual que o rio principal. O Uso e Cobertura do Solo recebeu o menor peso relativo (0,0735), pois a impermeabilização eleva o escoamento superficial, mas de modo mais indireto que os quatro fatores topográficos e hidrográficos anteriores.

Aplicados os pesos, com a consistência da matriz já verificada ($RC = 0,0073$), os cinco critérios reclassificados foram combinados na tabela de atributos dos setores censitários, pela Calculadora de Campos do QGIS, segundo a expressão: Índice de Suscetibilidade = (Altimetria $\times$ 0,2154) + (Declividade $\times$ 0,2154) + (Proximidade à Drenagem $\times$ 0,1208) + (Proximidade ao Rio $\times$ 0,3750) + (Uso do Solo $\times$ 0,0735); onde cada termo corresponde ao valor de suscetibilidade de 1 a 5 já atribuído a cada critério nas Tabelas 2 a 5, e não ao dado bruto de origem.

Reclassifica-se, por fim, o Índice de Suscetibilidade em cinco classes de suscetibilidade, de muito baixa a muito alta. O corte, diferentemente dos cinco critérios que o compõem, segue a distribuição real dos valores calculados, tratamento já dado, nos demais componentes, às variáveis derivadas de dados

locais; prática compatível com a literatura de mapeamento de suscetibilidade, em que a classificação final em cinco classes é o padrão e as quebras naturais figuram entre os métodos mais adotados por se adaptarem à estrutura dos dados, com o intervalo igual mantido como candidato pela leitura mais direta que oferece à gestão.

3.7.2 Ponderação e Índice de Exposição

A ponderação relativa entre os três critérios do componente Exposição seguiu o mesmo procedimento aplicado ao componente Suscetibilidade, com uma matriz de comparação pareada 3×3, na qual cada critério é confrontado com os demais segundo a escala de Saaty, da qual derivam os pesos relativos de cada um. A consistência dos julgamentos é verificada pela Razão de Consistência, como nos demais componentes, antes de os pesos serem aplicados sobre os critérios reclassificados por combinação linear ponderada, gerando o Índice de Exposição de cada setor, conforme a Tabela 14 – Matriz de julgamento par a par do componente Exposição.

Tabela 14 – Matriz de julgamento par a par do componente Exposição

Critério	Densidade populacional	Equip. sensíveis	Ocupação construída	AV	AV.N
Densidade populacional	1,00	3,00	2,00	1,8171	0,5396
Equip. sensíveis	0,33	1,00	0,50	0,5503	0,1634
Ocupação construída	0,50	2,00	1,00	1,0000	0,2970
Soma	1,8333	6,00	3,50	3,3674	1,0000

$\lambda_{\text{máx}} = 3,0092$ $n = 3$ $IC = 0,0046$ $IR = 0,58$ $RC = 0,0079$

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na matriz da Exposição, a Densidade Populacional recebeu o maior peso (0,5396), por medir diretamente o contingente populacional exposto ao fenômeno. A Taxa de Ocupação Construída ficou em segundo lugar (0,2970), como medida do volume de patrimônio edificado exposto. Os Equipamentos Urbanos Sensíveis receberam o menor peso relativo (0,1634): embora relevantes pela função que desempenham, são pontuais em número frente aos outros dois critérios. A matriz obteve $RC = 0,0079$, dentro do limite de consistência, gerando a seguinte expressão:

Índice de Exposição = (Densidade Populacional × 0,5396) + (Taxa de Ocupação Construída × 0,2970) + (Equipamentos Urbanos Sensíveis × 0,1634); onde cada termo corresponde ao valor de suscetibilidade de 1 a 5 já atribuído a cada critério nas Tabelas 6 a 8, combinados na tabela de atributos dos setores censitários pela Calculadora de Campos do QGIS.

O Índice de Exposição é reclassificado em cinco classes, com o corte definido a partir da distribuição real dos valores calculados.

3.7.3 Ponderação e Índice de Vulnerabilidade

A ponderação relativa entre os quatro critérios de Vulnerabilidade seguiu o mesmo desenho empregado na Suscetibilidade e na Exposição: uma matriz de comparação pareada 4×4, na qual cada critério é confrontado com os demais segundo a escala de Saaty, da qual derivam os pesos relativos de cada um, com a consistência dos julgamentos verificada pela Razão de Consistência, como nos demais componentes. Aplicados os pesos sobre os quatro critérios reclassificados por combinação linear ponderada, obtém-se o Índice de Vulnerabilidade de cada setor, segundo a Tabela 15 – Matriz de julgamento par a par do componente Vulnerabilidade.

Tabela 15 – Matriz de julgamento par a par do componente Vulnerabilidade

Critério	Renda	Escolaridade	Dens. domiciliar	Idosos e crianças	AV	AV.N
Renda	1,00	3,00	4,00	1,00	1,8612	0,3854
Escolaridade	0,33	1,00	2,00	0,33	0,6866	0,1422
Dens. domiciliar	0,25	0,50	1,00	0,25	0,4204	0,0871
Pop. faixas dependentes	1,00	3,00	4,00	1,00	1,8612	0,3854
Soma	2,5833	7,50	11,00	2,5833	4,8295	1,0000

$\lambda_{\text{máx}} = 4,0151$ $n = 4$ $IC = 0,0050$ $IR = 0,90$ $RC = 0,0056$

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na matriz da Vulnerabilidade, Renda e Percentual de População em Faixas Etárias Dependentes dividiram o maior peso (0,3854 cada). A capacidade de

recuperação financeira e menor autonomia física de resposta figuram entre os fatores mais citados na literatura de vulnerabilidade social a desastres. A Escolaridade recebeu peso intermediário (0,1422), como proxy de acesso à informação de risco. A Densidade Domiciliar recebeu o menor peso relativo (0,0871), pois mesmo o adensamento agravando a vulnerabilidade, isso ocorre de forma mais indireta que os demais critérios. A matriz obteve $RC = 0,0056$, bem abaixo do limite de consistência, resultando na expressão abaixo:

Índice de Vulnerabilidade = $(Renda \times 0,3854) + (Densidade \text{ Domiciliar} \times 0,0871) + (Escolaridade \times 0,1422) + (População \text{ em Faixas Etárias Dependentes} \times 0,3854)$; onde cada termo corresponde ao valor de vulnerabilidade de 1 a 5 já atribuído a cada critério nas Tabelas 9 a 12, combinados na tabela de atributos dos setores censitários pela Calculadora de Campos do QGIS.

Segue-se a reclassificação do Índice de Vulnerabilidade em cinco classes, de muito baixa a muito alta, com o método de corte (como nos critérios deste componente), definido pela distribuição real dos valores calculados e o intervalo igual mantido entre os candidatos.

3.8 INTEGRAÇÃO DOS COMPONENTES E CARTA DE FATORES DE RISCO

A integração final reúne os três índices intermediários construídos nas seções anteriores, todos já reclassificados na escala comum de suscetibilidade de 1 a 5 e agregados ao setor censitário urbano, unidade espacial adotada em todo o trabalho. É somente nesta etapa que os três componentes se encontram, pois até aqui, cada um foi calculado e interpretado de forma isolada, precisamente para preservar a informação que uma fusão prematura ocultaria, conforme já justificado anteriormente. O risco, tal como fundamentado no referencial teórico, não se reduz a nenhum dos três termos isoladamente, mas à coincidência espacial entre um fenômeno físico propenso a ocorrer, a presença de pessoas e estruturas em seu caminho e uma capacidade desigual de suportá-lo e dele se recuperar; é essa coincidência que a etapa de integração torna explícita, setor a setor.

Os três índices componentes, já calculados por setor na tabela de atributos da malha censitária, são individualmente convertidos para o formato raster sobre uma grade comum, com o mesmo sistema de referência, a mesma extensão e a mesma resolução dos demais produtos matriciais do trabalho, exigência de alinhamento

célula a célula que a álgebra de mapas impõe; a conversão preserva, em cada célula da grade, o valor do setor censitário ao qual ela pertence.

Sobre essa base comum, a integração é executada por álgebra de mapas na calculadora raster do QGIS. O Índice de Fatores de Risco de cada célula resulta da combinação linear ponderada dos três rasters componentes. Os pesos relativos de Suscetibilidade, Exposição e Vulnerabilidade derivam de uma matriz de comparação pareada 3×3, construída segundo a escala de Saaty, e verificada pela Razão de Consistência, pelo mesmo procedimento aplicado aos três componentes. Os dados são apresentados na Tabela 16 – Matriz de julgamento par a par entre os três índices componentes.

Tabela 16 – Matriz de julgamento par a par entre os três índices componentes

Índice	Suscetibilidade	Vulnerabilidade	Exposição	AV	AV.N
Suscetibilidade	1,00	2,00	4,00	2,0000	0,5584
Vulnerabilidade	0,50	1,00	3,00	1,1447	0,3196
Exposição	0,25	0,33	1,00	0,4368	0,1220
Soma	1,75	3,3333	8,00	3,5815	1,0000

$\lambda_{\max} = 3,0183$ $n = 3$ $IC = 0,0091$ $IR = 0,58$ $RC = 0,0158$

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A matriz de comparação entre os três índices atribuiu o maior peso a Suscetibilidade (0,5584), por expressar a condição física do território que efetivamente desencadeia o fenômeno. A Vulnerabilidade recebeu o segundo maior peso (0,3196), refletindo a centralidade da capacidade de resposta da população na definição do risco. Já a Exposição recebeu o menor peso relativo (0,1220). A matriz obteve $RC = 0,0158$, dentro do limite de consistência, logo:

Índice de Fatores de Risco = (Índice de Suscetibilidade × 0,5584) + (Índice de Vulnerabilidade × 0,3196) + (Índice de Exposição × 0,1220); aplicada pixel a pixel, na Calculadora Raster do QGIS, sobre a grade comum descrita no parágrafo anterior.

O Índice de Fatores de Risco, por sua vez, também é reclassificado em cinco classes, de fator de risco muito baixo a muito alto, com o método de corte definido, como nos fechamentos dos três componentes anteriores, a partir da distribuição real dos valores calculados, com o intervalo igual entre os métodos candidatos.

Diferentemente dos critérios individuais de Exposição e Vulnerabilidade, porém, não há aqui avaliação por ajuste de variância. O Índice de Fatores de Risco é produto calculado a partir de três outros índices, não variável observada diretamente, e seu corte é definido, por isso, sobre a distribuição resultante da própria integração dos três componentes.

A carta de fatores de risco resultante sintetiza, para os 45 setores censitários urbanos da área de estudo, a suscetibilidade combinada a alagamentos e inundações, expressa pela integração ponderada dos três componentes dos fatores de risco. Após os resultados a carta final é confrontada espacialmente com os registros históricos de alagamentos e inundações na cidade de União, por meio do cruzamento dos locais registrados com as classes da carta, verificando se as ocorrências conhecidas recaem preferencialmente nas classes de fatores de risco mais elevadas. Esse confronto constitui um procedimento de verificação da plausibilidade do produto frente à experiência efetivamente registrada do território.

Mais do que um produto cartográfico, constitui instrumento de priorização para o planejamento urbano e a gestão de risco municipal, ao permitir que a alocação de medidas estruturais e não estruturais siga uma hierarquia territorial objetiva, resposta direta ao caráter aplicado desta pesquisa, já declarado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os cinco critérios físicos do componente Suscetibilidade, os três critérios da Exposição e os quatro da Vulnerabilidade são apresentados a seguir, cada um interpretado isoladamente. Em seguida são apresentados os pesos obtidos nas quatro matrizes de comparação pareada do Processo de Análise Hierárquica, os três índices que essas matrizes produzem e a carta de fatores de risco que os integra.

4.1 COMPONENTE SUSCETIBILIDADE

O componente Suscetibilidade reúne cinco critérios físicos de suscetibilidade, calculados por média zonal contínua nos 45 setores censitários urbanos. Os cinco critérios são apresentados em uma escala adimensional de suscetibilidade, de 1 (muito baixa) a 5 (muito alta), obtida pela reclassificação de cada variável física conforme os procedimentos já descritos na metodologia e pela média, em cada setor, dos valores de suscetibilidade atribuídos aos pixels que o compõem. Os valores relatados a seguir referem-se sempre a essa nota de suscetibilidade, não à grandeza física de origem de cada critério (cota em metros, declividade em porcentagem ou distância em metros).

4.1.1 Altimetria

A nota de suscetibilidade por Altimetria variou entre 2,81 e 4,92. Os valores mais baixos couberam aos setores dos bairros Centro e Cruzeiro, onde o relevo se eleva em torno do “Morro do Cruzeiro”. Os mais altos, aos bairros Areias, Buritizinho e São João, na várzea baixa a oeste e sudoeste da área de estudo. A Tabela 17 – Distribuição dos setores por classe de suscetibilidade, Altimetria, mostra a distribuição concentrada quase por inteiro nas duas classes superiores: 26 setores (57,8%), na classe alta e 15 (33,3%), na muito alta, contra quatro (8,9%), na intermediária e nenhum abaixo dela. Esse resultado é coerente com o relevo predominantemente baixo da bacia urbana de União, e confirma, na escala do setor censitário, algo já conhecido da drenagem urbana, onde cotas mais baixas acumulam água com mais facilidade.

Tabela 17 – Distribuição dos setores por classe de suscetibilidade, Altimetria

Classe de suscetibilidade	Nº de setores	%
3 (Média, nota 2,6–3,4)	4	8,9
4 (Alta, nota 3,4–4,2)	26	57,8
5 (Muito alta, nota 4,2–5,0)	15	33,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.1.2 Declividade

Quanto mais plano o terreno, mais devagar a água escoar e maior a suscetibilidade ao acúmulo. Por isso, na Declividade, nota alta significa relevo mais plano, o oposto do que o nome do critério sugeriria em uma primeira leitura. A nota de suscetibilidade variou entre 3,20 e 4,84, com 11 setores (24,4%) na classe alta e 32 (71,1%) na muito alta; só dois (4,4%) ficaram na intermediária, e nenhum abaixo dela, conforme a Tabela 18 – Distribuição dos setores por classe de suscetibilidade, Declividade.

Tabela 18 – Distribuição dos setores por classe de suscetibilidade, Declividade

Classe de suscetibilidade	Nº de setores	%
3 (Média, nota 2,6–3,4)	2	4,4
4 (Alta, nota 3,4–4,2)	11	24,4
5 (Muito alta, nota 4,2–5,0)	32	71,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os bairros Areias, Centro e São João, possuem os setores mais planos da área de estudo, caíram na classe superior; Cruzeiro, o mais inclinado, ficou isolado na intermediária. O Centro, porém, não é um bloco único, pois parte dele ocupa o núcleo plano da cidade, e parte se estende pela baixa vertente do morro. É essa mesma feição de relevo que torna o Cruzeiro o bairro com o setor menos suscetível por declividade e uma fração do Centro mais suscetível do que se esperaria de um bairro central.

4.1.3 Proximidade à Drenagem Secundária

Quarenta e um dos 45 setores urbanos (91,1%) caem na classe muito alta de suscetibilidade por Proximidade à Drenagem Secundária; os outros quatro (8,9%) ficam na alta. Nenhum setor de União escapa dessas duas classes superiores, segundo a Tabela 19 – Distribuição dos setores por classe de suscetibilidade, Proximidade à Drenagem Secundária.

Tabela 19 – Distribuição dos setores por classe de suscetibilidade, Proximidade à Drenagem Secundária

Classe de suscetibilidade	Nº de setores	%
4 (Alta, nota 3,4–4,2)	4	8,9
5 (Muito alta, nota 4,2–5,0)	41	91,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A nota de suscetibilidade foi de 3,42 a 5,00, com os valores máximos nos bairros São Judas Tadeu, Dos Cocos e Cruzeiro, mais próximos da rede de canais e galerias extraída do modelo digital de terreno, e os mínimos no Centro e bairro Areias. Essa concentração quase total da malha urbana no topo da escala não é efeito da reclassificação, é a densidade real da rede de drenagem secundária que corta o núcleo urbano, tornando o alagamento por extravasamento de canais um risco praticamente onipresente na cidade, bem diferente do que mostra o critério seguinte.

4.1.4 Proximidade ao Rio Parnaíba

Este critério foi tratado como autônomo em relação à drenagem secundária por uma razão conceitual, pois a rede de canais responde por alagamento, o acúmulo de água por insuficiência da drenagem urbana, enquanto o rio Parnaíba responde por inundação, o extravasamento do curso d'água para além do seu leito menor, fenômeno de outra magnitude. Tratá-los juntos apagaria essa diferença na carta final.

Feita essa distinção, o resultado inverte o padrão do critério anterior: 39 dos 45 setores (86,7%) ficam na classe mais baixa de suscetibilidade, e só um (2,2%) chega à alta, e nenhum alcança a muito alta, como pode ser observado Tabela 20 – Distribuição dos setores por classe de suscetibilidade, Proximidade ao Rio Parnaíba.

Tabela 20 – Distribuição dos setores por classe de suscetibilidade, Proximidade ao Rio Parnaíba

Classe de suscetibilidade	Nº de setores	%
1 (Muito baixa, nota 1,0–1,8)	39	86,7
2 (Baixa, nota 1,8–2,6)	1	2,2
3 (Média, nota 2,6–3,4)	4	8,9
4 (Alta, nota 3,4–4,2)	1	2,2

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A nota de suscetibilidade variou entre 1,00 e 3,45, com os valores mais altos em no bairro Beira Rio e Buritizinho, adjacentes à margem oeste, e os mais baixos no restante da malha urbana, mais afastada do curso d'água. A diferença em relação à drenagem secundária tem explicação de forma, não de método, pois o rio corre por um único limite da área de estudo, a oeste, enquanto os canais internos atravessam a cidade inteira.

4.1.5 Uso e Cobertura do Solo

Este é o único dos cinco critérios da Suscetibilidade obtido por classificação supervisionada de imagem, não por modelo digital de elevação ou distância euclidiana, e isso importa para como os números abaixo devem ser lidos.

A nota de suscetibilidade foi de 2,02 a 3,96, mais alta no Centro e no bairro dos Cocos, onde a impermeabilização é maior, e mais baixa em setores periféricos do mesmo bairro dos Cocos, ainda com cobertura vegetal relevante, e no Beira Rio.

A Tabela 21 – Distribuição dos setores por classe de suscetibilidade, Uso e Cobertura do Solo, concentra 27 setores (60,0%) na classe intermediária, com nove (20,0%) em cada uma das classes vizinhas, a distribuição mais equilibrada entre os cinco critérios da Suscetibilidade, sem o acúmulo em uma única classe que aparece nos demais. Vale ressaltar que o bairro dos Cocos volta a aparecer nos dois extremos, como já o Centro na Declividade, ou seja, um bairro com núcleo adensado e franjas periféricas ainda pouco ocupadas, heterogeneidade que a média por setor preserva em vez de apagar.

Tabela 21 – Distribuição dos setores por classe de suscetibilidade, Uso e Cobertura do Solo

Classe de suscetibilidade	Nº de setores	%
2 (Baixa, nota 1,8–2,6)	9	20,0
3 (Média, nota 2,6–3,4)	27	60,0
4 (Alta, nota 3,4–4,2)	9	20,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.2 COMPONENTE EXPOSIÇÃO

A Exposição reúne três critérios reclassificados em cinco classes discretas, de muito baixa a muito alta, aplicadas sobre os 45 setores censitários da área de estudo.

4.2.1 Densidade Populacional

A Densidade Populacional oscilou entre 182,2 e 9.403,6 habitantes por km², com 30 dos 45 setores (66,7%) nas duas classes mais baixas: dez na muito baixa, vinte na baixa, segundo a Tabela 22 – Distribuição dos setores por classe de Densidade Populacional. O bairro dos Cocos concentra o setor de maior densidade da área de estudo, em um núcleo de ocupação adensada. Já os setores dos bairros Areias e Vila Nova Conquista concentram as densidades mais baixas, em setores de ocupação rarefeita na franja urbana. Só seis setores, 13,3% do total, chegam às duas classes superiores de exposição por este critério.

Tabela 22 – Distribuição dos setores por classe de Densidade Populacional

Classe	Nº de setores	%
1 (Muito baixa)	10	22,2
2 (Baixa)	20	44,4
3 (Média)	9	20,0
4 (Alta)	4	8,9
5 (Muito alta)	2	4,4

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.2.2 Taxa de Ocupação Construída

A taxa de ocupação construída variou entre 0,76% e 36,36% de área construída por setor, distribuída em 9, 14, 10, 6 e 6 setores entre as cinco classes. A classe mais alta é ocupada inteiramente pelos seis setores do Centro, o bairro de maior adensamento construtivo da cidade. Na outra ponta, a classe mais baixa reúne nove setores espalhados por oito bairros diferentes, dois no bairro dos Cocos e um em cada um dos demais, o que mostra que a baixa ocupação construída não é característica de um único bairro, mas um padrão disperso pela periferia urbana.

As classes intermediárias concentram a maior parte dos setores, 14 na classe baixa e 10 na média, formando uma faixa de transição entre o núcleo mais denso e a periferia mais dispersa, presente sobretudo no bairro São Pedro, São Sebastião e São Judas Tadeu. Esse gradiente reforça que o patrimônio edificado exposto a alagamentos e inundações se concentra de forma desproporcional no Centro, onde a maior densidade construtiva representa também maior volume de bens sujeitos a dano em caso de evento hidrológico. A Tabela 23 – Distribuição dos setores por classe de Taxa de Ocupação Construída, demonstra esses dados.

Tabela 23 – Distribuição dos setores por classe de Taxa de Ocupação Construída

Classe	Nº de setores	%
1 (Muito baixa)	9	20,0
2 (Baixa)	14	31,1
3 (Média)	10	22,2
4 (Alta)	6	13,3
5 (Muito alta)	6	13,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.2.3 Equipamentos Urbanos Sensíveis

Dezenove dos 45 setores (42,2%) não registraram nenhum equipamento sensível no levantamento e por isso caem na classe mais baixa de exposição, não por falha da reclassificação, mas porque o dado ali é mesmo zero, como pode-se observar na Tabela 24 – Distribuição dos setores por classe de Equipamentos Urbanos Sensíveis. Os equipamentos variaram de 0 a 64,53 unidades por km², concentrados em sua maioria no centro da cidade. A periferia da malha urbana praticamente não tem esses serviços, o mesmo padrão de concentração central que volta a aparecer adiante, na leitura conjunta do componente.

Tabela 24 – Distribuição dos setores por classe de Equipamentos Urbanos Sensíveis

Classe	Nº de setores	%
1 (Muito baixa)	19	42,2
2 (Baixa)	12	26,7
3 (Média)	7	15,6
4 (Alta)	5	11,1
5 (Muito alta)	2	4,4

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.3 COMPONENTE VULNERABILIDADE

A Vulnerabilidade reúne quatro critérios reclassificados em cinco classes discretas, de muito baixa a muito alta, aplicadas sobre os 45 setores censitários urbanos.

4.3.1 Renda

A Renda é o único critério do trabalho com direção invertida, pois quanto menor o rendimento do responsável pelo domicílio, maior a vulnerabilidade do setor. Os valores foram de R\$ 797,15 a R\$ 3.107,87. A Tabela 25 – Distribuição dos setores por classe de Renda, concentra 36 dos 45 setores (80,0%) nas três classes intermediárias e superiores de vulnerabilidade, somente três (6,7%), todos no Centro, chegam à classe de menor vulnerabilidade, de maior renda. As rendas mais baixas, e por isso a maior vulnerabilidade, ficam no bairro Vila Nova Conquista e bairro dos Cocos, bairros de periferia. Com a maioria dos setores nas classes mais altas, a fragilidade de renda está espalhada por União, não restrita a alguns pontos extremos.

Tabela 25 – Distribuição dos setores por classe de Renda

Classe	Nº de setores	%
1 (Muito baixa)	3	6,7
2 (Baixa)	6	13,3
3 (Média)	15	33,3
4 (Alta)	12	26,7
5 (Muito alta)	9	20,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.3.2 Densidade Domiciliar

Os setores dos bairros São Sebastião e Areias concentram as maiores densidades domiciliares, e por isso a maior vulnerabilidade por este critério. O Centro concentra as menores. A variação, de 2,9 a 3,9 moradores por domicílio, é a menor entre os quatro critérios da Vulnerabilidade (pouco mais de um morador de diferença entre os extremos), o que já antecipa o peso relativo baixo que este critério recebe na ponderação, conforme a Tabela 26 – Distribuição dos setores por classe de Densidade Domiciliar.

Tabela 26 – Distribuição dos setores por classe de Densidade Domiciliar

Classe	Nº de setores	%
1 (Muito baixa)	8	17,8
2 (Baixa)	15	33,3
3 (Média)	11	24,4
4 (Alta)	7	15,6
5 (Muito alta)	4	8,9

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.3.3 Escolaridade

Medida pela taxa de analfabetismo do responsável pelo domicílio, a Escolaridade variou de 6,40% a 32,91%, com 24 dos 45 setores (53,3%) nas classes baixa e média, uma curva mais concentrada no meio do que nos extremos, segundo a Tabela 27 – Distribuição dos setores por classe de Escolaridade. Os setores do bairro Vila Nova Conquista têm o maior analfabetismo da área de estudo, e por isso a maior vulnerabilidade por este critério. Já os setores do Centro, possuem o menor.

Tabela 27 – Distribuição dos setores por classe de Escolaridade

Classe	Nº de setores	%
1 (Muito baixa)	4	8,9
2 (Baixa)	11	24,4
3 (Média)	13	28,9
4 (Alta)	11	24,4
5 (Muito alta)	6	13,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.3.4 Percentual de População em Faixas Etárias Dependentes

O bairro Vila Nova Conquista concentra os setores com as classes de maior vulnerabilidade em Renda e em Escolaridade. É também lá, porém, que fica o setor com o menor percentual de população dependente (soma da população de 0 a 14 anos e de 60 anos ou mais sobre a população total do setor) de toda a área de estudo, variável que foi de 31,42% a 44,19%. A classe de maior vulnerabilidade por este critério concentra-se nos setores dos bairros Nossa Senhora das Graças e São Judas Tadeu. Já a de menor, fica nos bairros Vila Nova Conquista e São José. A Tabela 28 – Distribuição dos setores por classe de Percentual de População em Faixas Etárias Dependentes, reúne a maior parte dos setores, 18 (40,0%), na classe baixa.

Tabela 28 – Distribuição dos setores por classe de Percentual de População em Faixas Etárias Dependentes

Classe	Nº de setores	%
1 (Muito baixa)	5	11,1
2 (Baixa)	18	40,0
3 (Média)	11	24,4
4 (Alta)	7	15,6
5 (Muito alta)	4	8,9

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O contraste dentro de Vila Nova Conquista, vulnerabilidade alta em renda e escolaridade e baixa em população dependente, mostra que os quatro critérios deste componente medem dimensões parcialmente independentes da fragilidade social, não uma única condição de pobreza repetida igual em cada setor. É essa independência parcial, mais do que qualquer coincidência entre os critérios, que

justifica combiná-los por pesos diferentes na ponderação a seguir.

4.4 PONDERAÇÃO POR PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA

Os pesos de cada critério, e dos três componentes entre si, vêm de quatro matrizes de comparação pareada segundo a escala fundamental de Saaty. Em cada uma, o peso de um critério é a média geométrica de seus julgamentos na linha correspondente, normalizada pela soma das médias geométricas de toda a matriz. A Razão de Consistência, obtida do Índice de Consistência calculado sobre o Índice Aleatório tabelado para a ordem da matriz, confere se os julgamentos fazem sentido entre si, com limite de aceitação em 0,10. As quatro matrizes abaixo passaram nesse limite.

4.4.1 Matriz da Suscetibilidade

O maior peso da Suscetibilidade foi para a Proximidade ao Rio Parnaíba (0,3750), o critério mais ligado ao extravasamento do curso d'água. Altimetria e Declividade empataram no segundo posto (0,2154 cada), tratadas como igualmente relevantes por descreverem, de ângulos diferentes, a mesma condição de acúmulo de água em cotas baixas e terrenos planos.

A Proximidade à Drenagem Secundária ficou com peso intermediário (0,1208), ligada ao alagamento por extravasamento de canais; o Uso e Cobertura do Solo recebeu o menor peso (0,0735), porque a impermeabilização eleva o escoamento de forma mais indireta que os quatro critérios topográficos e hidrográficos. A razão de consistência da matriz confirmou julgamentos coerentes, conforme a Tabela 29 – Pesos da matriz de comparação pareada do componente Suscetibilidade.

Tabela 29 – Pesos da matriz de comparação pareada do componente Suscetibilidade

Critério	Peso (AV.N)
Proximidade ao Rio Parnaíba	0,3750
Altimetria	0,2154
Declividade	0,2154
Proximidade à Drenagem Secundária	0,1208
Uso e Cobertura do Solo	0,0735

(n = 5; $\lambda_{\text{máx}}$ = 5,0329; IC = 0,0082; RC = 0,0073)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.4.2 Matriz da Exposição

A Densidade Populacional levou o maior peso (0,5396) por medir direto o número de pessoas expostas ao fenômeno. A Taxa de Ocupação Construída veio em seguida (0,2970), como proxy do volume de edificações e bens em risco. Os Equipamentos Urbanos Sensíveis ficaram com o menor peso dos três (0,1634), não por serem menos críticos institucionalmente, hospital e escolas continuam sendo estruturas sensíveis, mas por sua frequência pontual na área de estudo. A Tabela 30 – Pesos da matriz de comparação pareada do componente Exposição, apresenta os dados.

Tabela 30 – Pesos da matriz de comparação pareada do componente Exposição

Critério	Peso (AV.N)
Densidade Populacional	0,5396
Taxa de Ocupação Construída	0,2970
Equipamentos Urbanos Sensíveis	0,1634

(n = 3; $\lambda_{\text{máx}}$ = 3,0092; IC = 0,0046; RC = 0,0079)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.4.3 Matriz da Vulnerabilidade

Renda e Percentual de População em Faixas Etárias Dependentes dividiram o maior peso, empatados em 0,3854, os dois fatores mais citados na literatura de vulnerabilidade social a desastres como determinantes da capacidade de resposta, um pela via financeira, outro pela etária. A Escolaridade recebeu peso intermediário (0,1422), como proxy de acesso à informação de risco; a Densidade Domiciliar ficou com o menor peso (0,0871), por seu efeito mais indireto sobre a vulnerabilidade

frente aos demais critérios. A Tabela 31 – Pesos da matriz de comparação pareada do componente, demonstra essa ponderação.

Tabela 31 – Pesos da matriz de comparação pareada do componente Vulnerabilidade

Critério	Peso (AV.N)
Renda	0,3854
Percentual de População em Faixas Etárias Dependentes	0,3854
Escolaridade	0,1422
Densidade Domiciliar	0,0871

($n = 4$; $\lambda_{\text{máx}} = 4,0151$; IC = 0,0050; RC = 0,0056)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.4.4 Matriz de Integração dos Índices

Esta última matriz compara os três componentes entre si para formar o Índice de Fatores de Risco. Segundo a Tabela 32 – Pesos da matriz de comparação pareada entre os três índices componentes, a Suscetibilidade concentrou o maior peso, 0,5584, por corresponder à condição física necessária à ocorrência do alagamento ou da inundação; sem ela, os demais fatores perdem efeito. A Vulnerabilidade recebeu peso de 0,3196, superior ao da Exposição, pois a capacidade da população de responder e se recuperar altera diretamente as consequências de um mesmo evento. Já a presença isolada de pessoas e bens, medida pela Exposição, não basta para determinar a gravidade do risco, o que explica seu peso mais baixo, 0,1220. A razão de consistência da matriz, superior à das três comparações anteriores, manteve-se abaixo do limite de 0,10,

Tabela 32 – Pesos da matriz de comparação pareada entre os três índices componentes

Índice	Peso (AV.N)
Suscetibilidade	0,5584
Vulnerabilidade	0,3196
Exposição	0,1220

($n = 3$; $\lambda_{\text{máx}} = 3,0183$; IC = 0,0091; RC = 0,0158)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.5 ÍNDICES INTEGRADOS E CARTA DE FATORES DE RISCO

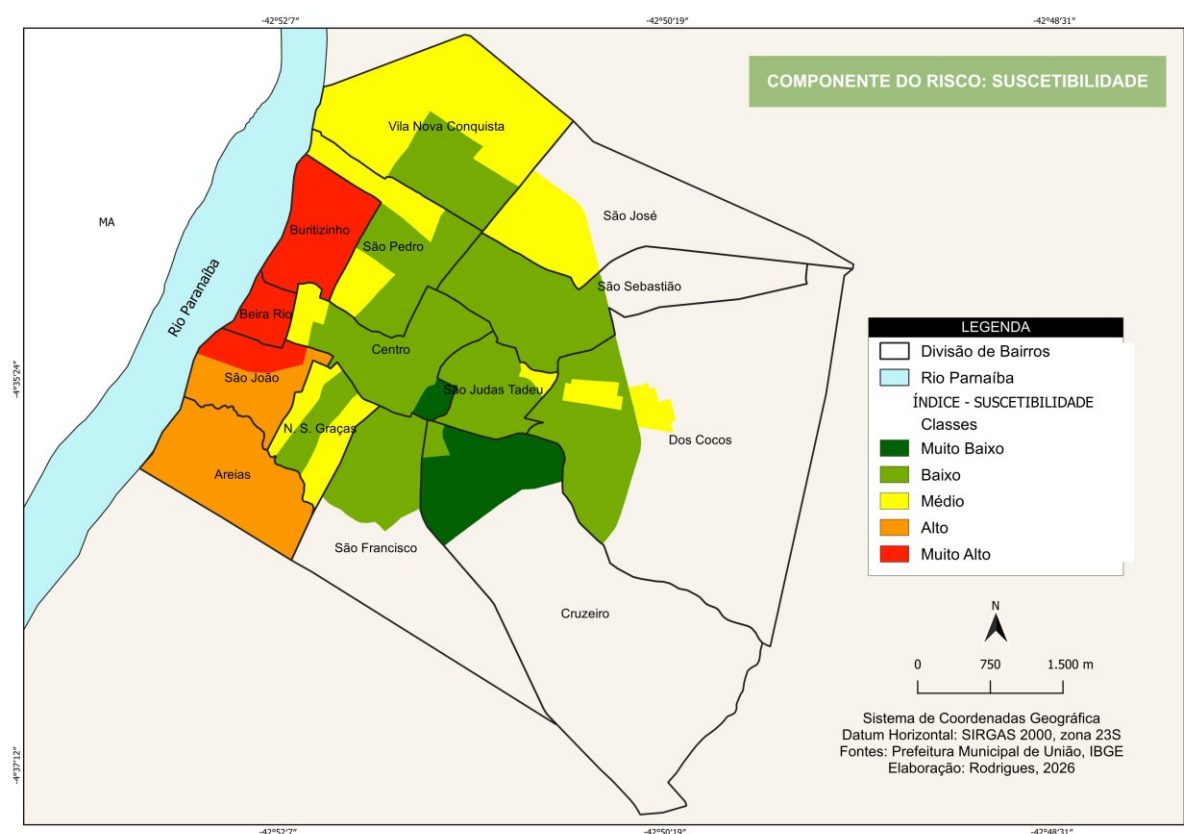
Após a combinação dos três índices por meio de seus respectivos pesos, os

resultados foram reclassificados em cinco classes pelo método de intervalo igual, considerando o intervalo de valores observado. Adotou-se o mesmo critério estatístico empregado nos demais índices deste trabalho. Logo, chega-se assim, as quatro cartas temáticas: Suscetibilidade, Exposição, Vulnerabilidade e, por fim, Fatores de Risco, resultante da integração dos três componentes.

4.5.1 Índice de Suscetibilidade

O Índice de Suscetibilidade classifica 44,05% da área de estudo, 5,34 km², na classe Baixo, e mais 6,84% (0,83 km²) em Muito Baixo, pouco mais da metade do território urbano fora da faixa mais suscetível. Essa metade mais segura coincide, no espaço, com os setores do Centro, Cruzeiro e São Sebastião, bairros altos e afastados da rede de drenagem. No extremo oposto, Alto e Muito Alto somam 21,63% da área, 2,62 km², concentrados em Beira Rio, Buritizinho e São João, bairros ribeirinhos de cota baixa. Conforme pode ser visto na Figura 21 – Carta do Índice de Suscetibilidade, e na Tabela 33 – Distribuição por área das classes do Índice de Suscetibilidade, a distribuição reproduz, de forma aproximada, o que já se via isoladamente na Altimetria e na Proximidade ao Rio Parnaíba, dois dos critérios de maior peso na matriz da Suscetibilidade.

Figura 21 – Carta do Índice de Suscetibilidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 33 – Distribuição por área das classes do Índice de Suscetibilidade

Classe	Área (km²)	% da área total
Muito Baixo	0,83	6,84
Baixo	5,34	44,05
Médio	3,33	27,47
Alto	1,50	12,37
Muito Alto	1,12	9,26

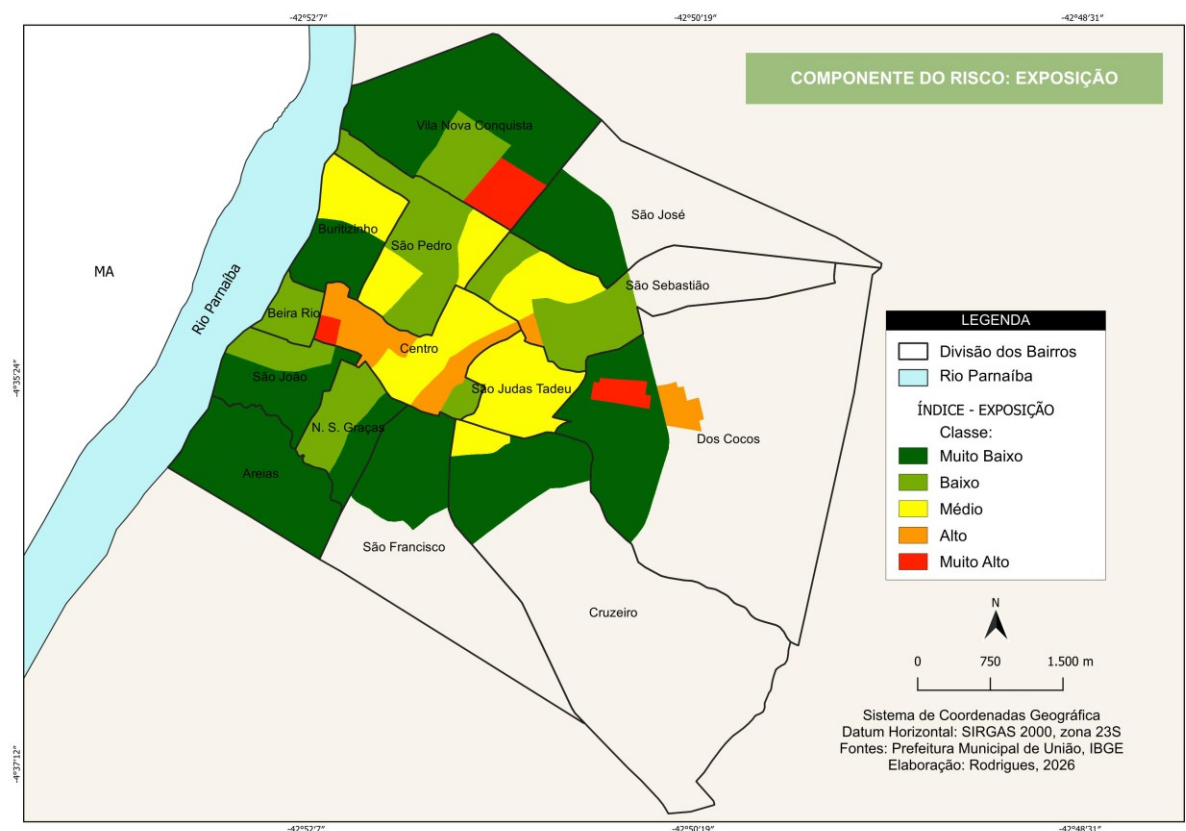
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.5.2 Índice de Exposição

Mais da metade da área de estudo, 53,05%, ou 6,43 km², cai na classe Muito Baixo do Índice de Exposição, e Médio, Alto e Muito Alto juntos não ultrapassam um quarto do território (25,74%). A concentração é coerente com a própria natureza do índice, medido por densidade populacional, ocupação construída e equipamentos urbanos sensíveis, fatores presentes em poucos núcleos da cidade. Os setores dos bairros dos Cocos e Vila Nova Conquista reúnem os valores mais altos, mas o bairro

dos Cocos também aparece entre os mais baixos. É o mesmo bairro heterogêneo já identificado na Densidade Populacional e no Uso do Solo, com setores densos convivendo com setores ainda esvaziados, distinção que o índice integrado preserva em vez de diluir. A Figura 22 – Carta do Índice de Exposição e a Tabela 34 – Distribuição por área das classes do Índice de Exposição, demonstram esses dados.

Figura 22 – Carta do Índice de Exposição



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 34 – Distribuição por área das classes do Índice de Exposição

Classe	Área (km ²)	% da área total
Muito Baixo	6,43	53,05
Baixo	2,57	21,21
Médio	2,14	17,66
Alto	0,60	4,97
Muito Alto	0,38	3,11

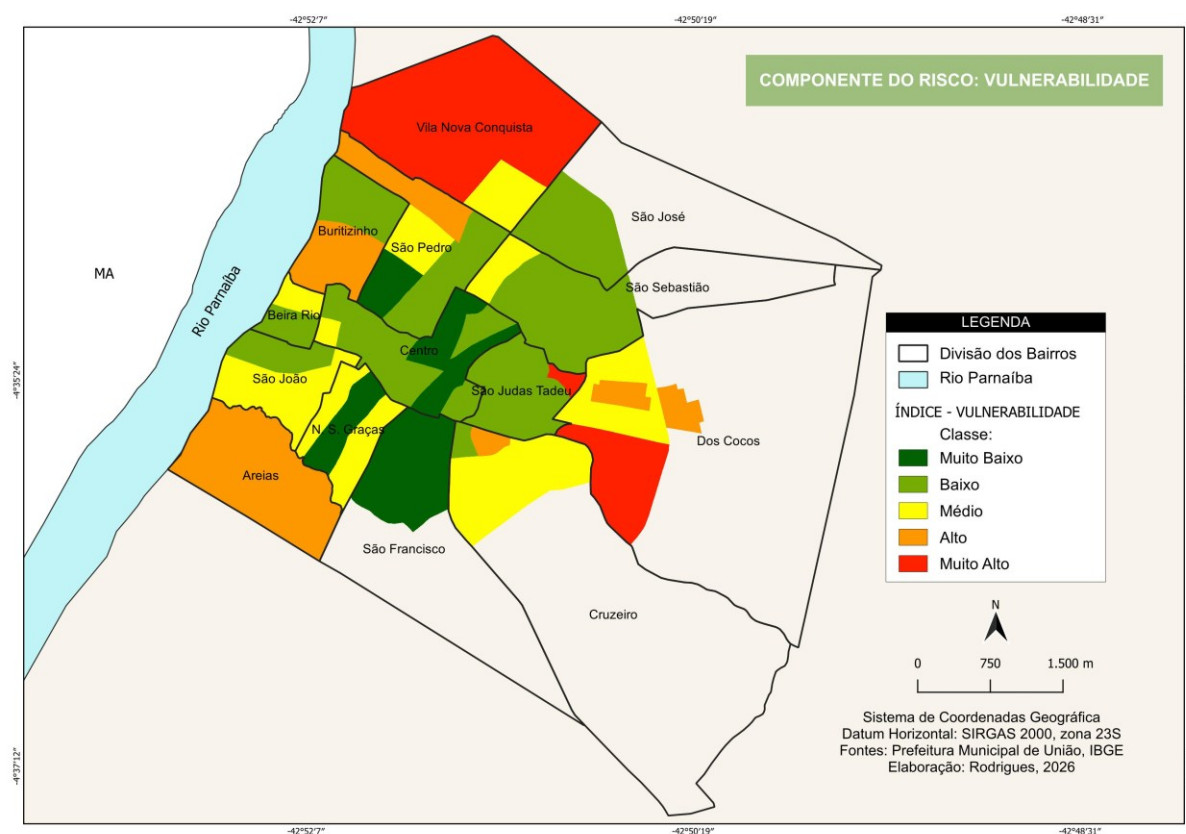
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.5.3 Índice de Vulnerabilidade

Segundo a Figura 23 – Carta do Índice de Vulnerabilidade e a Tabela 35 –

Distribuição por área das classes do Índice de Vulnerabilidade, nos setores do Centro, onde renda mais alta e menos analfabetismo se somam, está o menor Índice de Vulnerabilidade da área de estudo. Nos setores do bairro São Judas Tadeu, bairro dos Cocos e Vila Nova Conquista, no extremo oposto, pelo menos um setor de cada bairro reúne classe alta ou muito alta nos quatro critérios de vulnerabilidade ao mesmo tempo, acúmulo de desvantagem em várias frentes sociais e não uma fragilidade isolada em um único critério. Em área, essa periferia mais vulnerável responde por 36,37% do território, 4,41 km², somando Alto e Muito Alto, enquanto nenhuma classe isolada ultrapassa um terço do total. Entre os três componentes, é o mais equilibrado entre extremos.

Figura 23 – Carta do Índice de Vulnerabilidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 35 – Distribuição por área das classes do Índice de Vulnerabilidade

Classe	Área (km²)	% da área total
Muito Baixo	1,39	11,51
Baixo	3,69	30,49
Médio	2,62	21,64
Alto	1,97	16,28
Muito Alto	2,43	20,09

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

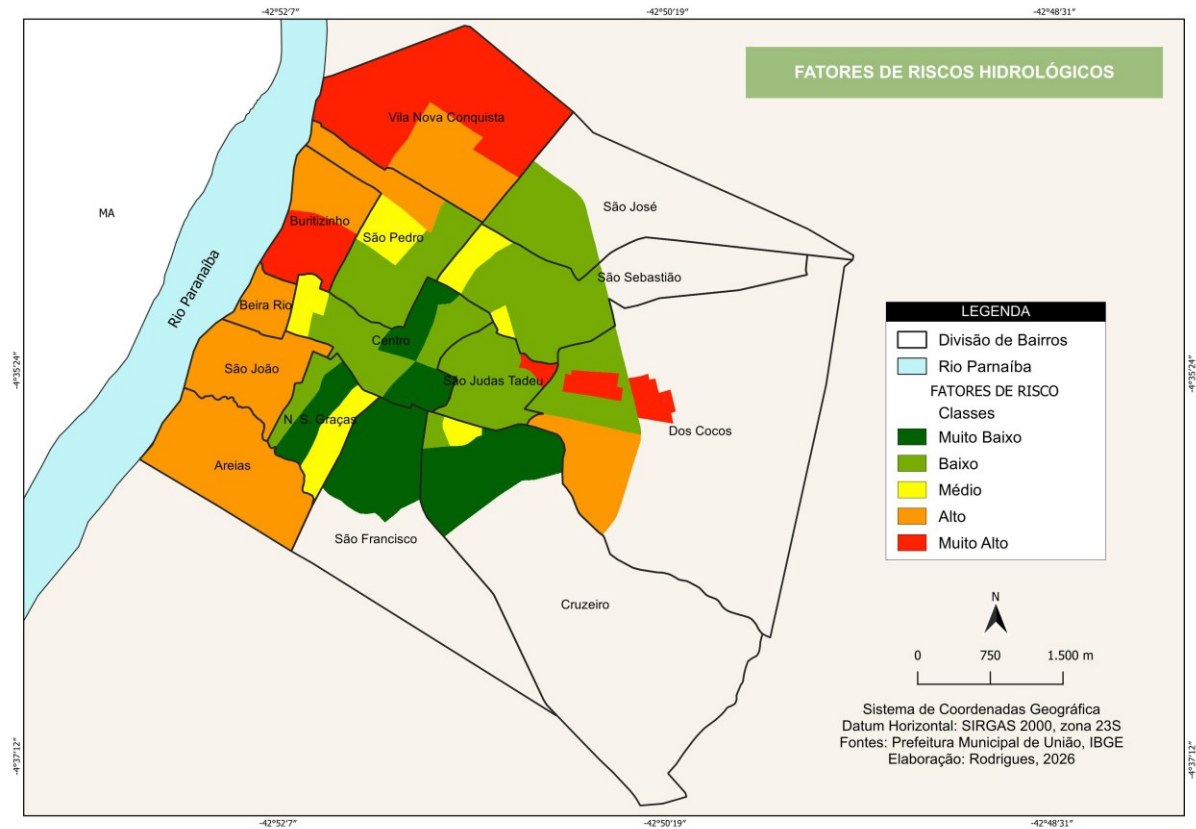
4.5.4 Carta de Fatores de Risco

A Carta de Fatores de Risco, síntese ponderada dos três índices, é mais baixa nos setores do Centro e nos bairros São Francisco, Cruzeiro e Nossa Senhora das Graças, e mais alta nos bairros São Judas Tadeu, dos Cocos, Buritizinho e Vila Nova Conquista. Em área, Baixo e Alto dividem quase igualmente o território, 29,96% (3,63 km²) e 29,84% (3,62 km²) respectivamente, enquanto a classe Médio, com apenas 6,49% (0,79 km²), é a menor de toda a distribuição, Já em Muito Baixo e Muito Alto fecham os extremos com 15,72% e 17,99%.

Essa forma bimodal, concentrada nos dois blocos externos e escassa no meio da escala, é coerente com o próprio mecanismo de formação do Risco. Como ele nasce da combinação ponderada de três componentes com pesos bem diferentes entre si, um setor tende a herdar rapidamente a classificação do componente que mais pesa, a Suscetibilidade, com 0,5584, ou a ser puxado para cima pela Vulnerabilidade, com 0,3196, o que reduz a chance de o resultado final pousar exatamente no meio da escala.

É o que acontece no setor com maior fator de risco de toda a área de estudo, no bairro São Judas Tadeu. A Suscetibilidade ali é apenas mediano, mas a Vulnerabilidade, no próprio teto da área de estudo, desloca esse setor para a classe de maior risco. A carta integrada, conforme a Figura 24 – Carta de Fatores de Risco de alagamentos e inundações urbanas, não repete o mapa de nenhum dos três componentes isolados.

Figura 24 – Carta de Fatores de Risco de alagamentos e inundações urbanas



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Esse resultado, segundo a Tabela 36 – Distribuição por área das classes da Carta de Fatores de Risco, reproduz um padrão já conhecido na literatura de vulnerabilidade social a desastres urbanos. Os setores do Centro concentram a maior Exposição, densidade, ocupação e equipamentos sensíveis, e a menor Vulnerabilidade, com renda mais alta e menos analfabetismo, enquanto os setores dos bairros da periferia, Vila Nova Conquista, bairro dos Cocos e São Judas Tadeu, apresentam o padrão inverso, com pouca exposição e muita vulnerabilidade.

Tabela 36 – Distribuição por área das classes da Carta de Fatores de Risco

Classe	Área (km²)	% da área total
Muito Baixo	1,90	15,72
Baixo	3,63	29,96
Médio	0,79	6,49
Alto	3,62	29,84
Muito Alto	2,18	17,99

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

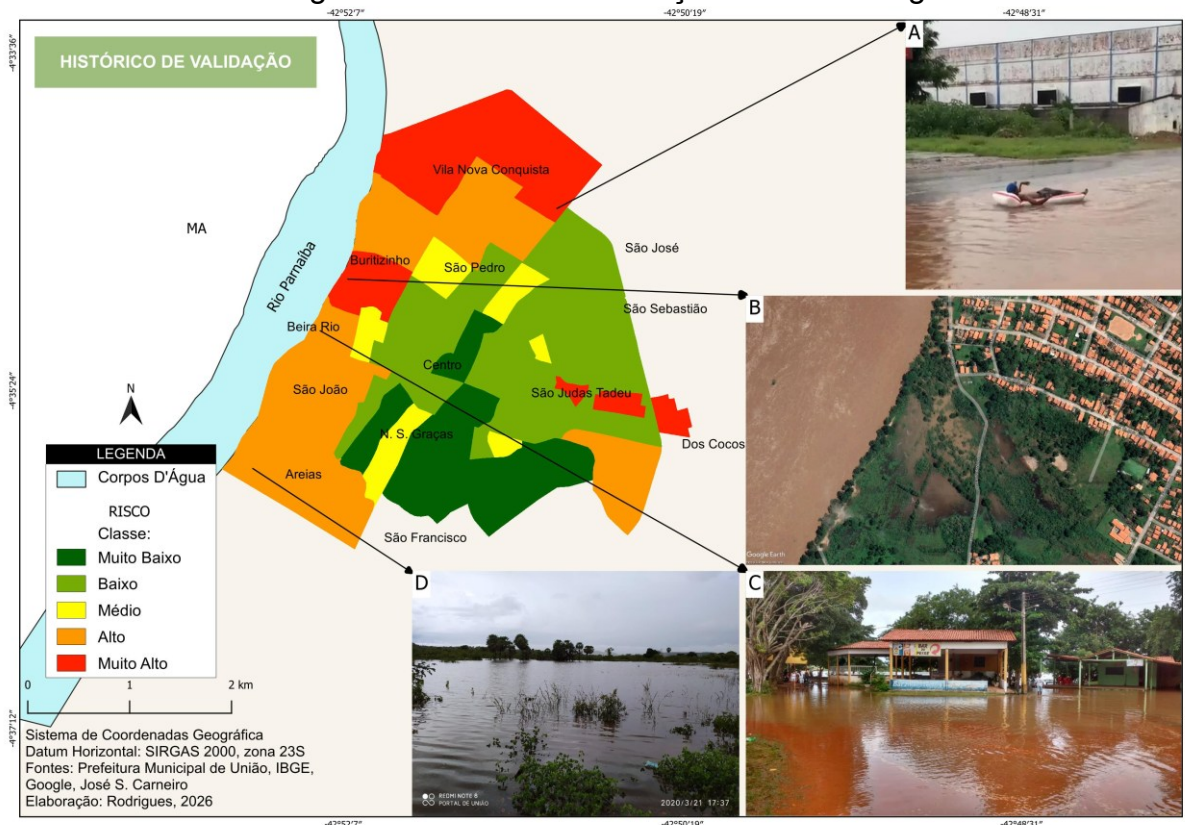
Essa desigualdade entre o núcleo urbano consolidado e sua periferia aparece

com frequência em estudos de vulnerabilidade socioambiental no Brasil, e mostra que o fator de risco calculado por AHP, mesmo partindo de dados físicos e sociodemográficos objetivos, acaba reproduzindo uma desigualdade territorial que a gestão urbana de União já conhece por outras vias.

4.6 CONFRONTO COM O HISTÓRICO DE ALAGAMENTOS

Para validar as classes dos mapas gerados, comparou-se o resultado com eventos reais de inundação e alagamentos documentados em União entre 2008 e 2021. A Figura 25 – Carta de Validação da Metodologia, sintetiza essa validação, cruzando o mapa de fatore de risco a locais onde já ocorreram episódios hidrológicos mais significativos.

Figura 25 – Carta de Validação da Metodologia



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O cruzamento mostrou coerência entre as áreas classificadas como risco muito alto e alto com os pontos de impacto confirmados na cidade. Os principais locais validados foram: (A) Rua 07 de Setembro, bairro Vila Nova Conquista, onde a

água atingiu altura crítica; (B) Buritizinho, com extravasamento recorrente; (C) Rua Anfísio Lobão, bairro Beira Rio, frequentemente alagado; (D) Bairro Areias, área de eventos hidrológicos periódicos. Esses quatro pontos, documentados por registro fotográfico, reforçam que a metodologia AHP + Suscetibilidade + Exposição + Vulnerabilidade capturou adequadamente os locais onde o risco é real e vivido pela população.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A carta de fatores de risco construída para os 45 setores urbanos de União-PI confirma que o risco de alagamento e inundação na cidade não segue uma distribuição homogênea nem previsível a partir do relevo isolado. Apenas cinco setores, distribuídos por quatro bairros diferentes, chegam à classe Muito Alto de fator de risco, e o restante da área de estudo fica em classes intermediárias ou baixas. Essa concentração pontual só pôde ser lida com confiança porque o Processo de Análise Hierárquica manteve consistência estatística do início ao fim da integração. As quatro matrizes de julgamento par a par apresentaram razão de consistência entre 0,0056 e 0,0158, valores bem abaixo do limite de 0,10 fixado por Saaty.

O produto final resulta inteiramente de dados públicos e de software livre, entre eles imagens de satélite, modelo digital de elevação, dados do Censo Demográfico do IBGE e o QGIS. Isso torna o método replicável por qualquer gestão municipal de porte semelhante, sem depender de contratação de serviço especializado ou de equipamento de coleta próprio.

A classe Muito Alto de Suscetibilidade física concentra-se nos setores censitários de três bairros, Beira Rio e Buritizinho por inteiro, além de um dos dois setores do bairro São João. O setor de maior Suscetibilidade de toda a cidade fica no bairro Beira Rio, o mais próximo do rio Parnaíba entre os 45 setores. Com uma exceção, no bairro Buritizinho, nenhum desses setores figura na classe Muito Alto de fator de risco final, porque sua Vulnerabilidade social é moderada ou baixa e não reforça o resultado da Suscetibilidade na integração. Nesse único setor de exceção, a Vulnerabilidade está na classe Alta, e essa combinação basta para elevá-lo também ao Muito Alto de risco.

Já o setor de maior fator de risco de toda a área de estudo fica no bairro São Judas Tadeu, e é uma exceção dentro do próprio bairro. Os outros dois setores que o compõem ficam nas classes mais baixas da carta. Esse setor tem Suscetibilidade física apenas mediano, mas é a Vulnerabilidade, no próprio teto da escala do componente, que o desloca para a classe mais crítica. Isso só é possível porque a Vulnerabilidade responde por 31,96% da integração final, atrás apenas da Suscetibilidade, com 55,84%, e à frente da Exposição, com 12,20%. O risco de alagamento em União, assim, não se explica apenas pela proximidade ao rio.

A diferença entre o setor de maior fator de risco da cidade e a média do próprio bairro em que ele está mostra por que a escolha do setor censitário como unidade de análise, e não o bairro, foi decisiva neste trabalho. Se os três setores do bairro São Judas Tadeu fossem tratados como um bloco único, o risco médio cairia para a classe Médio, e o ponto mais crítico da carta desapareceria dentro da média dos outros dois setores, mais baixos. É a escala fina, setor por setor, que permite à gestão municipal agir onde o problema de fato está, em vez de tratar um bairro inteiro como prioritário ou não com base em uma média que esconde o extremo.

O trabalho combina, em um único índice de fator de risco, elementos físicos, urbanos e sociais, todos integrados por Processo de Análise Hierárquica. Ponderar a vulnerabilidade social por setor censitário dentro da própria estrutura do AHP, e não apenas sobrepor a ao resultado físico ao final da análise, mantém a lógica multicritério do início ao fim do trabalho.

A carta resultante serve de subsídio à Defesa Civil e à gestão municipal na priorização de investimentos, e pode integrar a revisão do Plano Diretor de União. Para os setores de maior fator de risco, medidas de baixo custo e baixo impacto construtivo, como pavimento permeável, telhado verde e trincheiras de infiltração, aparecem como resposta compatível com a escala do problema identificado.

A validação dos resultados contra eventos hidrológicos reais entre 2008 e 2021 confirmou que as áreas mapeadas como fator de risco muito alto e alto coincidem com os locais onde a população efetivamente vivencia alagamentos e inundações. Os quatro pontos documentados (bairros Vila Nova Conquista, Buritizinho, Beira Rio e Areias), correspondem aos setores que o modelo identificou como críticos, validando que a abordagem AHP aplicada aos componentes Suscetibilidade, Exposição e Vulnerabilidade captura adequadamente as dinâmicas hidrológicas urbanas de União-PI.

Este resultado reforça a viabilidade do método para apoiar decisões de planejamento e gestão de risco em contextos urbanos similares. Logo, o método pode ainda ser testado em outros municípios de porte semelhante do Piauí e do Nordeste, com atualização periódica da base censitária e da ortofoto.

Como produto final, a carta de fatores risco oferece à gestão municipal de União uma base espacial, setor por setor, para orientar decisões sobre onde investir em drenagem e reduzir perdas nas áreas identificadas como de maior risco.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 1989.
- ADGER, W. N. Social vulnerability to climate change and extremes in coastal Vietnam. **World Development**, v. 27, n. 2, p. 249-269, 2000.
- ALMEIDA, C. M.; COSTA, C. S. **Tomada de decisão espacial: análise multicritério e geoprocessamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.
- ALVES, C. et al. Hydrological modeling in data-scarce regions: a case study from the Brazilian Northeast. **International Journal of River Basin Management**, v. 18, n. 2, p. 180-195, 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2023**: encarte especial sobre eventos hidrológicos extremos. Brasília: ANA, 2024.
- ANDRADE JÚNIOR, Aderson Soares de; BASTOS, Edson Alves; BARROS, Alexandre Hugo Cezar; SILVA, Clescy Oliveira da; GOMES, Adriano Alex Nascimento. **Classificação climática do Estado do Piauí**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2004. 86 p. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 86). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/68171/1/Doc86.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2026.
- ARNOLD, C. L.; GIBBONS, C. J. Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator. **Journal of the American Planning Association**, Chicago, v. 62, n. 2, p. 243-258, 1996.
- BASTOS, C. de A. **Dicionário histórico e geográfico do Estado do Piauí**. Teresina: Fundação Monsenhor Chaves – PMT, 1994. 600 p.
- BATES, B. C. et al. **Climate Change and Water**. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2008. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/climate-change-and-water-technical-paper/>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- BATISTA, D. J. R.; CARNEIRO, J. S. **Narrativas da história política, social, religiosa e econômica do município de União (PI): da origem à atualidade**. Teresina: Cancioneiro, 2021.
- BELTON, V.; STEWART, T. J. **Multiple criteria decision analysis: an integrated approach**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- BERTRAND, G. **Paisagem e geografia física global: esboço metodológico**. Caderno de Ciências da Terra, n. 13, p. 1-27, 1971.
- BIRKMANN, J. Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: conceptual frameworks and definitions. In: BIRKMANN, J. (Ed.). **Measuring**

vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies. Tokyo: United Nations University Press, 2006. p. 9-54.

BLAIKIE, P. et al. **At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters.** London: Routledge, 1994.

BRAGA, B. P. F.; PORTO, R. L. L.; TUCCI, C. E. M. Drenagem urbana. In: TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (Orgs.). **Inundações urbanas na América do Sul.** Porto Alegre: ABRH, 2018. p. 57-86.

BRASIL. Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Estatuto da Cidade. Disponível em: <https://www.mppi.mp.br/internet/2014/05/lei-federal-n-10-257-de-10-de-julho-de-2001/>. Acesso em: 28 ago. 2025.

BRASIL. Lei nº 10.741, de 1º de outubro de 2003. Dispõe sobre o Estatuto da Pessoa Idosa e dá outras providências. **Diário Oficial da União: seção 1**, Brasília, DF, p. 1, 3 out. 2003.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 28 ago. 2025.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012.** Volume Brasil. 2. ed. Florianópolis: UFSC/CEPED, 2013.

BRITO, R. S. **Vulnerabilidade social a inundações em contexto urbano.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M.; BERTOLUCCI, L. **Geoprocessamento e análise de decisão espacial.** São Paulo: Ática, 2000.

CAMPIOLI, M.; VIEIRA, R. Mapeamento de áreas de risco a inundação na bacia do rio Cubatão do Norte, Joinville, Santa Catarina. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 20, n. 71, p. 115-132, 2019.

CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes.** São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CANHOLI, A. P. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana.** São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CARDONA, O. D. **Gestão integral do risco de desastres:** vulnerabilidade, resiliência e mitigação. Bogotá: CEPAL, 2001.

CARVALHO, J. F.; MAGALHÃES, L. A.; CUNHA, S. B. Inundações urbanas: percepção e gestão em áreas de risco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 11, n. 1, p. 193-211, 2018.

CARVALHO, M. O. J. de. **Nossas raízes**. Teresina, 1992.

CASTELO BRANCO NETO, H. **História do Velho Homero**. Teresina: Editora Teresinense, 1989.

CASTRO, J. F. **Glossário de Defesa Civil**. Brasília: Secretaria Nacional de Defesa Civil, 2010.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

CIDADE VERDE. **União: enchente já deixou mais de 100 famílias desabrigadas**. Cidade Verde, 5 maio 2009. Disponível em: <https://cidadeverde.com/geral/37176/uniao-enchente-ja-deixou-mais-de-100-familias-desabrigadas>. Acesso em: 22 set. 2025.

CIDADE VERDE. **União: Rio Parnaíba deixa bairro da cidade debaixo d'água**. Cidade Verde, 4 maio 2009. Disponível em: <https://cidadeverde.com/geral/37088/uniao-rio-parnaiba-deixa-bairro-da-cidade-debaixo-dagua>. Acesso em: 22 set. 2025.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 2, p. 95-118, 2001.

CONCEIÇÃO, D. N. da. **Identificação e mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa e inundações/alagamentos na área urbana de Maceió, Alagoas**. 2023. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

COSTA, I. R. S.; TEIXEIRA, E. C.; COSTA, C. M.; BARROS, D. V.; SILVA, Q. D. Alagamentos e enxurradas: uma análise do uso e cobertura do solo na sub-bacia hidrográfica do riacho do Turu – São Luís-MA. **Revista GEONORTE**, v. 7, n. 26, p. 1-13, 2016.

COSTA, M. Avaliação da aplicabilidade de métodos de decisão multicritério no planejamento de recursos hídricos. **Revista de Gestão de Águas da América Latina**, Porto Alegre, v. 3, n. 1, p. 45-58, 2006.

COUTINHO, M. **Caxias das Aldeias Altas**: subsídios para sua história. 2. ed. Caxias: Prefeitura de Caxias, 2005.

CREPANI, E. et al. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao diagnóstico ambiental da Bacia do Rio Guaratuba**. São José dos Campos: INPE, 2001.

CRICHTON, D. The risk triangle. In: INGLETON, J. (ed.). **Natural disaster reduction**. London: Tudor Rose, 1999. p. 102-103.

CRUZ, C. B. M. et al. Avaliação ambiental integrada de bacias hidrográficas: aplicação à bacia do Alto e Médio Uruguai. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, n. 2, p. 63-78, 2013.

CUTTER, S. L.; BORUFF, B. J.; SHIRLEY, W. L. Social vulnerability to environmental hazards. **Social Science Quarterly**, v. 84, n. 2, p. 242-261, 2003.

DAILY, G. C. **Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems**. Washington, DC: Island Press, 1997.

DE SÁ, A. et al. **Inundações no Brasil: Causas, consequências e estratégias de mitigação**. São Paulo: Editora da USP, 2015.

DINIZ, M. P. et al. Impacto das inundações e alagamentos em áreas urbanas: estudo de caso em São Paulo. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 2, n. 3, p. 45-58, 2016.

EMBRAPA. **Súmula da 10ª Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1979.

ESTADO DO PIAUÍ. Lei nº 7.294, de 10 de dezembro de 2019. **Política Estadual de Regularização das Ocupações Exercidas sobre Terras Públicas e Devolutas**. Disponível em: https://sapl.al.pi.leg.br/media/sapl/public/normajuridica/2019/4581/7294_2019.pdf . Acesso em: 28 ago. 2025.

FERREIRA, E. P. **A mística do parentesco: uma genealogia inacabada: os Castello Branco e seus entrelaçamentos familiares (Francisco da Cunha Castello Branco e sua descendência)**. Parnaíba: Instituto Histórico, Geográfico e Genealógico de Parnaíba; São Paulo: Linear B Gráfica e Editora, 2008.

FERREIRA, M. T. S. **Mapeamento de risco de inundação em Natal-RN usando índice de vulnerabilidade**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

FONSECA, F. **Fundamentos conceituais de geoprocessamento e SIG**. São Paulo: Blucher, 2002.

FREITAS, M. A. et al. **Urbanização e enchentes: os desafios da gestão ambiental em grandes cidades brasileiras**. Caderno de Geografia, v. 2, n. 1, p. 12-25, 2022.

FRUTUOSO, R.; GRIGIO, A. M.; BARROS, M. Urbanização e impermeabilização do solo: impacto na hidrologia de bacias urbanas litorâneas brasileiras. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 17, n. 1, p. 1-18, 2020.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GODSCHALK, D. R. Urban hazard mitigation: creating resilient cities. **Natural Hazards Review**, Reston, v. 4, n. 3, p. 136-143, 2003.

GOSSLER, D. L. **Método multicritério aplicável a mapeamento de áreas com susceptibilidade à inundação: estudo de caso: Rolante-RS**. 2023. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia Fluvial**. 1. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

GUERRA, A. J. T.; GUERRA, A. M. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.

HOLLING, C. S. Resilience and stability of ecological systems. **Annual Review of Ecology and Systematics**, Palo Alto, v. 4, p. 1-23, 1973.

HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Transactions, American Geophysical Union**, v. 14, p. 446-460, 1933.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Banco de Dados de Informações Ambientais: BDIA**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/>. Acesso em: 25 abr. 2025.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. IBGE Cidades: União. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pi/uniao/panorama>. Acesso em: 11 maio de 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022: resultados e panorama**. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 01 out. 2025.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation**. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

JABUR, A. S. **Alterações Hidrológicas decorrentes de mudança do uso e ocupação do solo na Bacia hidrográfica do Alto Rio Ligeiro, Pato Branco – PR**. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

JENKS, G. F. The data model concept in statistical mapping. **International Yearbook of Cartography**, v. 7, p. 186-190, 1967.

JUNK, W. J.; BAYLEY, P. B.; SPARKS, R. E. The flood pulse concept in river-floodplain systems. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 106, n. 1, p. 110-127, 1989.

KATZMAN, R. et al. **Vulnerabilidad, activos y exclusión social en Argentina y Uruguay**. Santiago: CEPAL, 1999.

KAZAKIS, N.; KOUGIAS, I.; PATSIALIS, T. Assessment of flood hazard in Greece using multicriteria analysis. **European Water**, v. 49, p. 1-15, 2015.

LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G.; MILLER, J. P. Fluvial processes in **geomorphology**. San Francisco: W. H. Freeman, 1964.

LILLESAND, T. M. et al. **Remote sensing and image interpretation**. 7. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

LIMA, C. C. et al. **Identificação e Avaliação de Zonas de Alagamentos Urbanos na cidade de Natal, Nordeste do Brasil, com o suporte de Geotecnologias**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2019.

LIMA, I. M. M. F. Hidrografia do Estado do Piauí: disponibilidades e usos. In: AQUINO, C. M. S. A.; SANTOS, F. A. (Org.). **Recursos hídricos do Estado do Piauí: fundamentos de gestão e estudos de casos em bacias hidrográficas do centro-norte piauiense**. Teresina: EDUFPI, 2017. p. 43–68.

LIMA, K. C. O. **Mapeamento de áreas susceptíveis a inundação no perímetro urbano de Jequié, Bahia: uma abordagem integrada entre os métodos AHP e HAND**. 2025. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) – Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2025.

LIMA, L. D. B.; SILVA, C. E. M.; OLIVEIRA, C. M. E.; JUNIOR, J. C. R.; GOMES, D. P. P. Mapeamento de áreas suscetíveis a inundações na cidade do Recife (PE) - Brasil. **Espaço em Revista**, Catalão, v. 27, n. 1, p. 21-44, 2025. DOI: 10.70261/er.v27i1.74841

LIMA, M. G.; JÚNIOR, A. S. A. Climas do estado do Piauí e suas relações com a conservação do solo. In: AQUINO, C. M. S. A. (Org.). **Climas do Piauí: interações com o ambiente**. Teresina: EDUFPI, 2020. p. 16–36.

MAGALHÃES, I. A. L.; THIAGO, C. R. L.; AGRIZZI, D. V.; SANTOS, A. R. dos. Uso de Geotecnologias para Mapeamento de Áreas de Risco de Inundação em Guaçuí, ES: Uma Análise Comparativa entre dois métodos. **Cadernos de Geociências**, v. 8, n. 2, p. 63-70, nov. 2011.

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. **International Journal of Geographical Information Science**, London, v. 20, n. 7, p. 703-726, 2006.

MALCZEWSKI, J. On the use of weighted linear combination method in GIS: common and best practice approaches. **Transactions in GIS**, v. 4, n. 1, p. 5-22, 2000.

MALCZEWSKI, J. **GIS and multicriteria decision analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1999.

MANTOVANI, J. R. A. **Uso de geotecnologias para elaboração de um modelo de mapeamento de áreas suscetíveis à inundação e/ou alagamento, na bacia hidrográfica do Córrego Indaiá - MS**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Três Lagoas, 2016.

MAPBIOMAS. **Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. São Paulo: MapBiomass, 2023.

MARICATO, E. **O impasse da política urbana no Brasil**. Petrópolis: Vozes, 2011.

MARICATO, E. **Urbanismo na periferia do mundo globalizado**: metrópoles brasileiras. São Paulo: Hucitec, 2000.

MENDES, C. A. B.; CUNHA, A. P.; RODRIGUES, J. F. Geoprocessamento aplicado à drenagem urbana: análise multicritério em sistemas de informação geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, n. 4, p. 1-14, 2018.

MONTEIRO, C. A. F. et al. Estudos sobre cheias e inundações no Brasil: conceitos, causas e impactos. **Revista Brasileira de Hidrologia**, v. 12, n. 4, p. 300-315, 2017.

MORAIS, R. C. DE S.; ABREU, L. P. DE. Análise espacial da variabilidade de precipitação na bacia hidrográfica do rio Parnaíba, nordeste de Brasil. **Revista da Academia de Ciências do Piauí**, v. 2, n. 2, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpi.br/index.php/acipi/article/view/902/811>. Acesso em: 4 abr. 2024.

MOREIRA, R. et al. Densidade de edificações e taxa de ocupação construída como fatores de exposição a desastres hidrológicos em áreas consolidadas. **Revista de Estudos Urbanos e Regionais**, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 78-95, 2023.

MOURA, Ana Clara Mourão. Reflexões metodológicas como subsídio para estudos ambientais baseados em Análise de Multicritérios. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 2899-2906, 2007. Disponível em: <file:///C:/Users/55869/Downloads/xiii-sbsr-multicriterios-anamoura.pdf> . Acesso em: 2 nov. 2016.

MUNDA, G. Social multi-criteria evaluation: Methodological foundations and operational consequences. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 158, n. 3, p. 662-677, 2004.

NANSON, Gerald Charles; CROKE, J. C. A genetic classification of floodplains. **Geomorphology**, v. 4, n. 6, p. 459-486, 1992.

NEGREIROS, I. P. M. **Processamento de dados topográficos para o mapeamento da curvatura de vertentes**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2003.

NEVES, A. **O Piauí na Confederação do Equador**. 3. ed. Teresina: Academia Piauiense de Letras, 2019. 188 p. il. (Coleção Centenário, 111).

NUNES, O. **Pesquisas para a história do Piauí: a Balaiada. Início da luta no Maranhão e Piauí**. Teresina: FUNDAPI, 2007.

OLIVEIRA, M. Mapeamento multicritério de áreas suscetíveis à inundação e vulnerabilidade socioambiental no estado do Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 36, p. 112-130, 2025.

PELLING, M. **The Vulnerability of Cities: Natural Disasters and Social Resilience**. London: Earthscan, 2003.

PEREIRA, L. C. Dinâmica das inundações e seus impactos em áreas urbanas. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 65-74, 2013.

PEREIRA, R. T.; SILVA, L. M. Percepção comunitária e resposta a eventos hidrológicos. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 24, n. 1, p. 77-91, 2020.

PESSOA NETO, J. et al. Aplicação de análise multicritério (AHP) na modelagem de suscetibilidade a inundações na bacia do rio Duas Unas, Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 17, n. 1, p. 112-128, 2024.

FUNDAÇÃO CENTRO DE PESQUISAS ECONÔMICAS E SOCIAIS DO PIAUÍ. **Perfil socioeconômico do município de União**. Teresina: CEPRO, 2011.

Disponível em:

http://www.cepro.pi.gov.br/download/201106/CEPRO21_2af7222e47.pdf. Acesso em: 5 mai. 2025.

RIBEIRO, L. C. Q.; CARDOSO, A. L. (orgs.). **Da cidade ao bairro: para uma nova política de planejamento urbano no Brasil**. Rio de Janeiro: FASE, 1994.

RIGHETTO, A. M. **Manejo de águas pluviais urbanas**. PROSAB 5 – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Rio de Janeiro: [s.n.], 2009.

RODRIGUES, E. Água é vida: bem natural de domínio comum. **Revista Manuelzão (UFMG)**, Belo Horizonte, ed. Especial, ano 24, p. 15, 2022.

RODRIGUES, R. A.; SILVA, A. S.; SOUZA, C. A. Inundações e enchentes em áreas urbanas: desafios e perspectivas para a gestão pública. **Revista de Planejamento Urbano e Regional**, v. 8, n. 2, p. 120-135, 2020.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 8, p. 63-74, 1994.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: Ambiente e Planejamento**. São Paulo: Contexto, 2000.

RUFAT, S.; TATE, E.; BURTON, C. G.; MAROOF, A. S. Social vulnerability to floods: review of case studies and implications for measurement. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 14, p. 470-486, 2015.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process: planning, priority setting, resource allocation**. New York: McGraw-Hill, 1980.

SANTOS, F. A.; VENTORINI, S. E. Análise multicritério de decisão aplicada à suscetibilidade a inundações na bacia do córrego do Lenheiro, São João del-Rei/MG. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 74, n. 2, p. 320-335, 2022.

SANTOS, F. **Classes de fragilidade do relevo brasileiro segundo parâmetros morfométricos**. São Paulo: Contexto, 2025.

SAPUTRA, A. N.; NIKMAH; FITRIA, R. W. et al. Analysis of flood inundation mapping using the weighting method in urban floods. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1276, n. 1, p. 012026, 2023. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1276/1/012026>. Acesso em: 12 maio 2024.

SCHUELER, T. R. The importance of imperviousness. **Watershed Protection Techniques**, Ellicott City, v. 1, n. 3, p. 100-111, 1994.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Diagnóstico do município de União**. Organização de Robério Bôto de Aguiar e José Roberto de Carvalho Gomes. Fortaleza: CPRM, 2004. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/16463/1/Rel_Uniao.pdf. Acesso em: 25 abr. 2025.

SHARIF, B. et al. Urban flood modeling using Sentinel-1 radar data and 3D GIS analysis. **Journal of Hydrology**, v. 615, p. 1-15, 2023.

SILVA, A. S.; GUERRA, A. J. T.; GUERRA, T. A. Cheias e inundações em áreas urbanas: análise do fenômeno e medidas de mitigação. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 3, p. 167-180, 2019.

SILVA, A. V. X. **Uso de geotecnologias no mapeamento de áreas de vulnerabilidade ambiental em Campina Grande**. 2014. Monografia (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2014.

SILVA, C. H. C.; POLETO, L. J. C.; VILELA, T. A.; VIEIRA, C. A. O. **Determinação de áreas de risco e simulação de intervenções através do uso de SIG na Bacia Hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu**. Departamento de Engenharia Civil. Setor de Engenharia de Agrimensura. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG, 2009.

SILVA, J. A. **Direito Urbanístico Brasileiro e o Planejamento Urbano**. 4. ed. São Paulo: Malheiros, 2006.

SILVA, M. et al. Inundações, alagamentos e enchentes: uma análise integrada sobre as dinâmicas urbanas e suas consequências. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 3, p. 123-145, 2021.

SILVA, M. R. da. **União 163 anos: a história contada em números**. Teresina: Editora Biental, 2017.

SILVA, R. et al. Zoneamento de riscos socioambientais a alagamentos no município de São João de Meriti-RJ. **Análise Geográfica**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 1, p. 45-62, 2026.

SILVEIRA, A. L. L.; BETIM, F. A. Análise de cheias em bacias urbanas: modelagem e previsão. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, 17, 2007, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2007.

SILVEIRA, A. L.; TUCCI, C. E. M. Medidas não estruturais para o controle de cheias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 3, p. 25-38, 2011.

SILVEIRA, A. L.; TUCCI, C. E. M. Gestão da drenagem urbana. In: TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (Orgs.). **Inundações Urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: ABRH, 2011.

SMITH, K.; WARD, R. **Floods: physical processes and human impacts**. Chichester: John Wiley & Sons, 1998.

SOUSA, J. R. **De Estanhado a União: apontamentos**. União: Comepi, 1997.

SOUSA, R. C.; GARCIA, C. M. Enchentes e suas relações com a urbanização. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 32, n. 4, p. 158-173, 2022.

SOUZA, M. L. **Políticas públicas e gestão de bacias hidrográficas**. Belo Horizonte: UFMG, 2013.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, Boulder, v. 63, n. 11, p. 1117-1142, 1952.

SUGUIO, K. **Geomorfologia do Brasil**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

TELLMAN, B.; SULLIVAN, J. A.; KUHN, C.; KETTNER, A. J.; DOYLE, C. S.; BRAKENRIDGE, G. R.; ERICKSON, T. A.; SLAYBACK, D. Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. **Nature**, v. 596, p. 80-86, 2021.

TOMLIN, C. D. **Geographic Information Systems and Cartographic Modeling**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1990.

TOPALOV, C. **La brique, l'aiguille et le rationalisme: l'émergence de l'urbanisme moderne en Europe**. Paris: Éditions de l'EHESS, 1991.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

TUCCI, C. E. M. Drenagem urbana. **Ciência e Cultura**, v. 55, n. 4, p. 36-37, 2003.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Brasília: Ministério das Cidades/UNESCO, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 2007.

TUCCI, C. E. M. **Inundações Urbanas**. Porto Alegre: ABRH, 2008.

TUCCI, C. E. M. Tecnologias digitais aplicadas ao manejo e escoamento sustentável das águas pluviais na drenagem urbana. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 64, n. 3, p. 30-35, 2012.

TUCCI, C. E. M.; GENZ, F. Controle do impacto da urbanização. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. (orgs.). **Drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH; Ed. da Universidade/UFRGS, 1995. cap. 7, p. 277-347.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

UNIÃO (PI). In: **ENCICLOPÉDIA dos municípios brasileiros**. Rio de Janeiro: IBGE, 1959. v. 15. p. 647-648. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv27295_15.pdf. Acesso em: 25 abr. 2025.

UNIÃO (PI). Lei Complementar nº 886, de 18 de dezembro de 2024. **Dispõe sobre o novo Plano Diretor Municipal de União e dá outras providências**. Diário Oficial dos Municípios, União, PI, 18 dez. 2024. Acesso em: 25 abr. 2025.

UNIÃO (PI). Lei Municipal nº 494, de 21 de setembro de 2006. **Institui o Plano Diretor do Município de União e dá outras providências**. Diário Oficial dos Municípios, União, PI, 21 set. 2006.

UNIÃO (PI). Lei Municipal nº 622, de 24 de abril de 2014. **Dá redação ao Código de Obras e Edificações de União, Estado do Piauí e dá outras providências**. Diário Oficial dos M Municípios, União, PI, 24 abr. 2014.

UNIÃO (PI). Lei Municipal nº 665, de 10 de maio de 2016. **Institui o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) de União-PI**. Diário Oficial dos Municípios, União, PI, 10 maio 2016.

UNIÃO (PI). Lei Municipal nº 890, de 1 de dezembro de 2024. **Define as diretrizes para o uso do solo urbano do Município de União e dá outras providências**. Diário Oficial dos Municípios, União, PI, 1 dez. 2024.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (UNDRR). **Terminology on Disaster Risk Reduction**. Geneva: UNDRR, 2017. Disponível em: <http://www.preventionweb.net/english/professional/terminology/>. Acesso em: 12 mar. 2023.

U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. SOIL CONSERVATION SERVICE. **Urban hydrology for small watersheds**. Technical Release 55. Washington, DC: USDA-SCS, 1986.

USGS. United States Geological Survey. **Floods: Recurrence intervals and 100-year floods**. 2015. Disponível em: <https://www.usgs.gov/natural-hazards/floods>. Acesso em: 25 ago. 2024.

VEYRET, Y. (org.) **Os riscos: O homem como agressor e vítima do meio ambiente**. São Paulo: Contexto, 2007.

VILLAÇA, F. Uma contribuição para a história do planejamento urbano no Brasil. In: DEÁK, C.; SCHIFFER, S. R. (org.). **O processo de urbanização no Brasil**. São Paulo: EDUSP, 1999.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.

WARD, J. V. et al. Riverine landscape diversity. **Freshwater Biology**, v. 47, n. 4, p. 517-539, 2002.

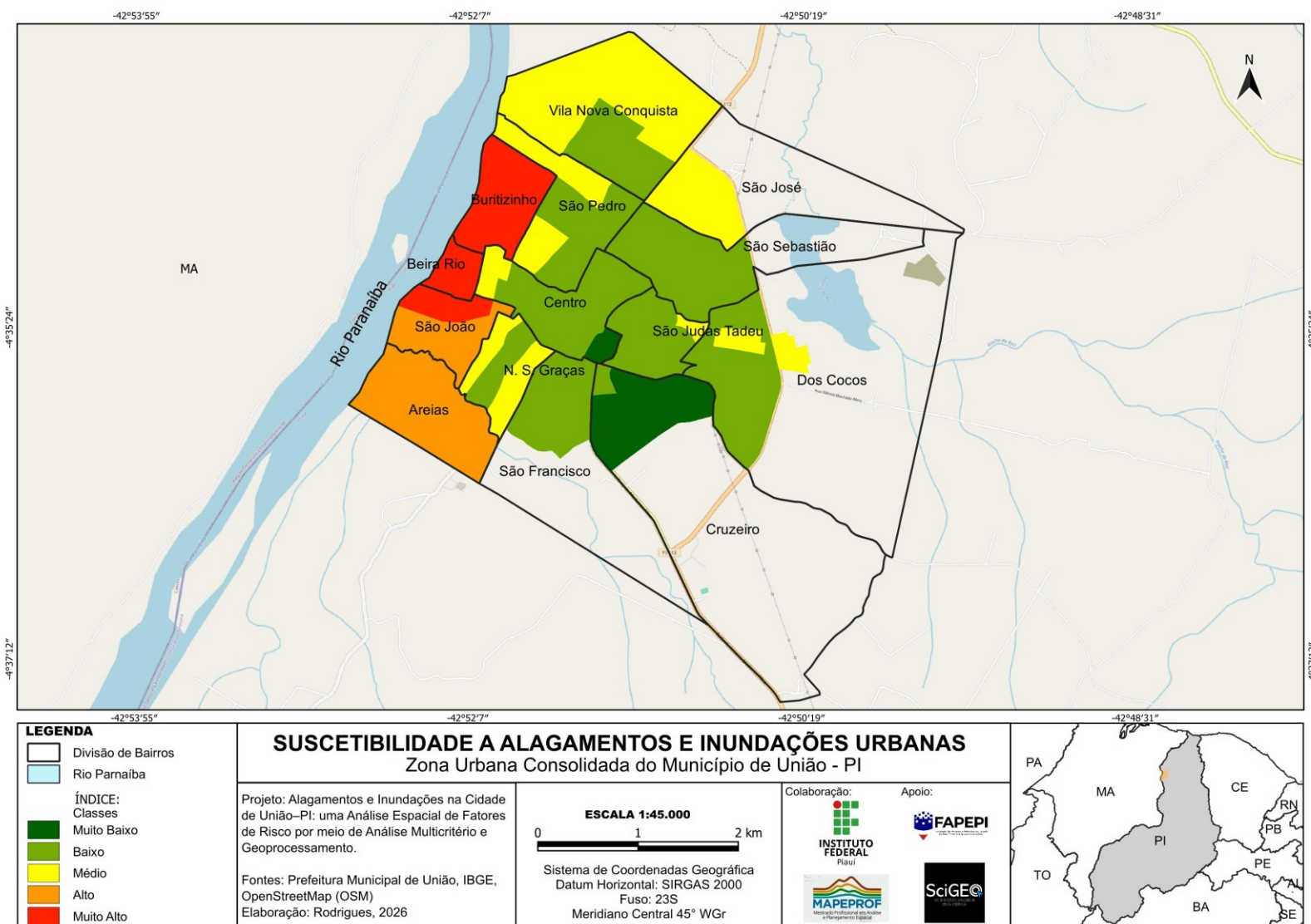
WIENHOLD, K. J. et al. Flood Inundation and Depth Mapping Using Unmanned Aerial Vehicles Combined with High-Resolution Multispectral Imagery. **Hydrology**, v. 10, n. 8, p. 158, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2306-5338/10/8/158>. Acesso em: 12 mai. 2024.

WISNER, B. et al. **At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters**. 2. ed. London: Routledge, 2004.

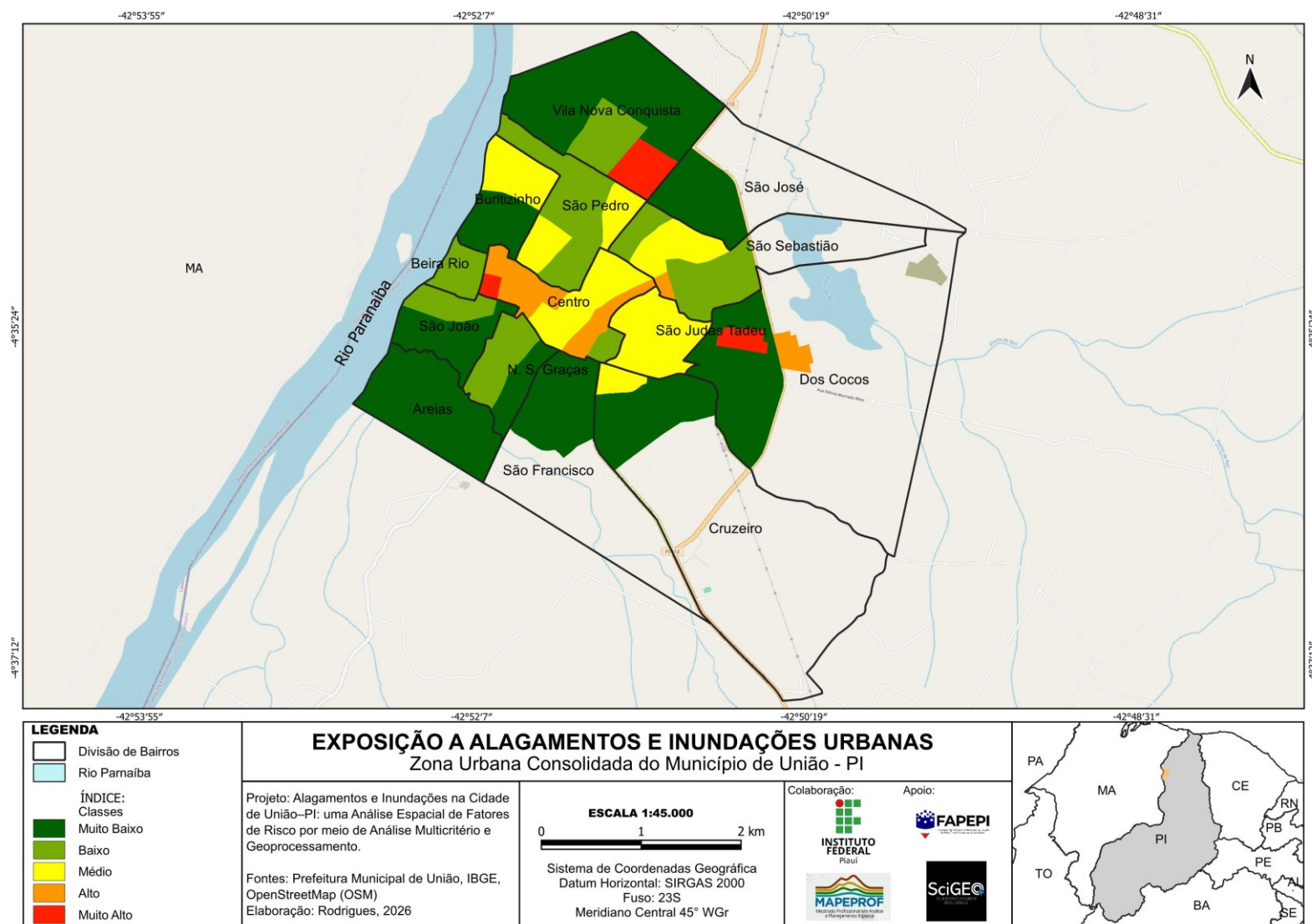
XAVIER-DA-SILVA, J. **Geoprocessamento para análise ambiental**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

ZONENSEIN, J. **Índice de Risco de Cheia para gestão integrada em áreas urbanas**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Rio de Janeiro, 2007.

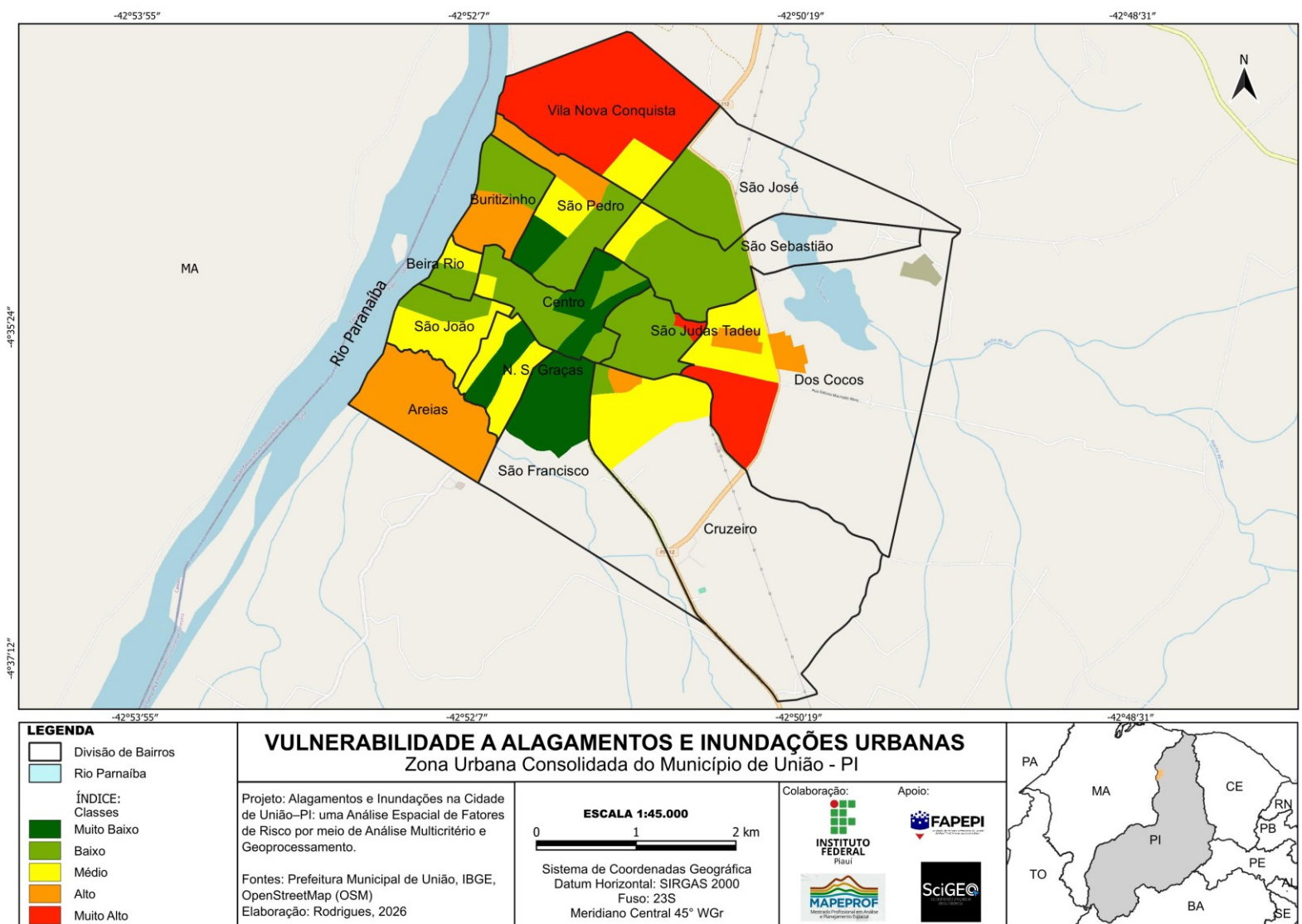
APÊNDICE A – CARTA DE SUSCETIBILIDADE A ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES URBANAS



APÊNDICE B – CARTA DE EXPOSIÇÃO A ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES URBANAS



APÊNDICE C – CARTA DE VULNERABILIDADE A ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES URBANAS



APÊNDICE D – CARTA DE FATORES DE RISCO A ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES URBANAS

