



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROJETO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANELISE MARTINS DE AZEVEDO

**ANÁLISE DA VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL A INUNDAÇÕES EM
MUNICÍPIOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IPOJUCA – PERNAMBUCO,
COM A INCLUSÃO DE FATORES TECNOLÓGICOS**

Campina Grande – PB
2024

ANELISE MARTINS DE AZEVEDO

**ANÁLISE DA VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL A INUNDAÇÕES EM
MUNICÍPIOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IPOJUCA – PERNAMBUCO,
COM A INCLUSÃO DE FATORES TECNOLÓGICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.
Orientadores: Prof. Dr. Mauro Normando Macêdo Barros Filho e Prof^ª. Dr^ª. Iana Alexandra Alves Rufino.

Campina Grande – PB
Setembro de 2024

A994a

Azevedo, Anelise Martins de.

Análise da vulnerabilidade socioambiental a inundações em municípios da bacia hidrográfica do rio Ipojuca – Pernambuco, com a inclusão de fatores tecnológicos / Anelise Martins de Azevedo. – Campina Grande, 2024.

87 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Mauro Normando Macêdo Barros Filho, Profa. Dra. Iana Alexandra Alves Rufino".

Referências.

1. Saneamento Ambiental. 2. Recursos Hídricos. 3. Sustentabilidade. 4. Desastres Hidrológicos. 5. Análise Espacial. 6. Mudanças Climáticas. I. Barros Filho, Mauro Normando Macêdo. II. Rufino, Iana Alexandra Alves. III. Título.

CDU 628:502.1(043)

ANELISE MARTINS DE AZEVEDO

**ANÁLISE DA VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL A INUNDAÇÕES EM
MUNICÍPIOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IPOJUCA – PERNAMBUCO,
COM A INCLUSÃO DE FATORES TECNOLÓGICOS**

Trabalho aprovado no dia 13 de setembro de 2024, em nível de mestrado, por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Mauro Normando Macedo Barros Filho – Orientador
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECA/UFCG

Prof.^a Dr.^a Iana Alexandra Alves Rufino - Coorientadora
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECA/UFCG

Prof.^a Dr.^a Andréa Carla Lima Rodrigues - Examinadora Interna
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECA/UFCG

Prof.^a Dr.^a Kainara Lira dos Anjos – Examinador Externo
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil – UAEC/UFCG

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Campina Grande, 13 de setembro de 2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**
2. **ALUNO(A): ANELISE MARTINS DE AZEVEDO / COMISSÃO EXAMINADORA: DR. MAURO NORMANDO MACÊDO BARROS FILHO - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADOR, DR.ª IANA ALEXANDRA ALVES RUFINO – PPGECA/UFCG – COORIENTADORA, DR.ª ANDRÉA CARLA LIMA RODRIGUES - PPGECA/UFCG - EXAMINADORA INTERNA, DR.ª KAINARA LIRA DOS ANJOS – UAEC/UFCG - EXAMINADORA EXTERNA (PORTARIA 38/2024)/ TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “ANÁLISE DA VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL DE MUNICÍPIOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IPOJUCA, PERNAMBUCO, COM A INCLUSÃO DE FATORES TECNOLÓGICOS” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL / HORA DE INÍCIO: 14:00 HORAS / FORMA DA SESSÃO: POR VIDEOCONFERÊNCIA.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA POR VIDEOCONFERÊNCIA, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO(A), ALUNO(A) E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 13 DE SETEMBRO DE 2024**



Documento assinado eletronicamente por **MAURO NORMANDO MACEDO BARROS FILHO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/09/2024, às 16:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANDREA CARLA LIMA RODRIGUES, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/09/2024, às 17:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Anelise Martins de Azevedo, Usuário Externo**, em 16/09/2024, às 08:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 16/09/2024, às 08:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **IANA ALEXANDRA ALVES RUFINO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/09/2024, às 16:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **KAINARA LIRA DOS ANJOS, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/09/2024, às 18:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4777636** e o código CRC **544C9437**.

À Yolanda, eternamente Yolanda.

AGRADECIMENTOS

Alcançar o título de mestre é uma conquista significativa em minha vida. No entanto, reconhecer que este é apenas mais um passo em uma jornada contínua de aprendizado e crescimento é minha forma de honrar todos os mestres - acadêmicos ou não - que passaram em minha vida e uma genuína demonstração de gratidão.

Sou grata a Deus por não ter me deixado desisti e pela calma e coragem que senti nessa reta final que só podem ter vindo dEle. Agradeço à minha avó Yolanda Azevedo Graça, que, embora não esteja conosco fisicamente, tem grande participação no meu crescimento e formação e sem ela jamais teria sido possível chegar até aqui.

Agradeço à minha mãe, minha irmã e meu cunhado que sempre me viram como mais inteligente e capaz do que eu acredito ser. Agradeço aos *close* primos, pois como diria minha tia: meus amigos são meus primos, e são mesmo. Meu muito obrigado a grande família Menezes por ser quem são. O que seria da vida sem os momentos de descontração ao lado de vocês?

Agradeço também aos amigos que acompanham de perto minhas batalhas e continuam comigo independente da vitória ou derrota: Jayne Monteiro, Mateus Valdevino, Roberta Keony, Elisa Vital e Wilma Vital. Aos professores queridos que tanto me ensinaram e incentivaram, e me ensinam até hoje, sempre serei sua aprendiz: Fabiana Santos, José Wanderley, Roberto Andrade e Ioná Rameh Barbosa.

Agradeço a Universidade Federal de Campina Grande - UFCG e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - PPGECA, na pessoa do coordenador Adriano Elísio e do secretário Flávio Cunha. Meus sinceros agradecimentos aos meus orientadores, Professores Mauro Normando e Iana Alexandra, pela compreensão e orientação ao longo dessa difícil jornada.

Aos professores do PPGECA que fizeram parte dessa construção profissional e acadêmica e aos meus colegas de curso com os quais dividi as dificuldades de ingressar em um mestrado em outro estado durante a pandemia de Covid-19. E por fim, expresso minha gratidão à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) pelo suporte financeiro e incentivo à pesquisa que foram essenciais para a realização deste trabalho.

“Nós somos vulcões... Quando nós, mulheres, oferecemos nossas experiências como nossas verdades, como verdades humanas, todos os mapas mudam. Surgem novas montanhas.”

Ursula K. Le Guin

RESUMO

Inundações estão entre os desastres hidrológicos mais frequentes no Brasil e afetam diversos municípios em Pernambuco, especialmente após os anos 2000. Embora de origem natural, as consequências das inundações variam conforme a vulnerabilidade das comunidades. Apesar do conceito de vulnerabilidade socioambiental ser amplamente utilizado, há poucos estudos que consideram fatores tecnológicos para essa análise. Este trabalho tem como objetivo analisar a vulnerabilidade socioambiental a inundações, incluindo fatores tecnológicos, para quatro municípios da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca. A metodologia envolveu uma pesquisa bibliográfica para identificação das variáveis mais utilizadas nas dimensões de vulnerabilidade social, ambiental e tecnológica, definição da área de estudo, obtenção e tratamento dos dados, composição de indicadores, e cálculo dos índices de vulnerabilidade socioambiental (IVSA) e do índice de vulnerabilidade integrada com fatores tecnológicos (IVSAT) através da equação proposta pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). A análise espacial foi realizada com sobreposição de mapas e Índice I de Moran global. Os principais resultados mostraram que ambos os índices apresentaram padrões espaciais semelhantes, com as áreas mais afastadas dos centros urbanos sendo as mais vulneráveis. Com a inclusão dos fatores tecnológicos, as áreas de baixa vulnerabilidade diminuíram, enquanto as áreas de alta vulnerabilidade aumentaram. Foi possível identificar áreas urbanas com alta vulnerabilidade em Caruaru e Escada. A inclusão de fatores tecnológicos na análise de vulnerabilidade a inundações oferece uma compreensão abrangente e pode orientar ações voltadas para redução da vulnerabilidade em áreas críticas.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade, Desastres hidrológicos, Análise espacial, Mudanças climáticas.

ABSTRACT

Floods are among the most frequent hydrological disasters in Brazil and affect several municipalities in Pernambuco, especially after the 2000s. Although natural in origin, the consequences of floods vary according to the vulnerability of communities. Despite the widespread use of the concept of socio-environmental vulnerability, there are few studies that consider technological factors in this analysis. This study aims to analyze socio-environmental vulnerability to floods, including technological factors, for four municipalities in the Ipojuca River Basin. The methodology involved a literature review to identify the most commonly used variables in the social, environmental, and technological vulnerability dimensions, the definition of the study area, data collection and processing, indicator composition, and the calculation of the socio-environmental vulnerability index (IVSA) and the vulnerability index integrated with technological factors (IVSAT) using the equation proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Spatial analysis was performed through map overlays and the global Moran's I Index. The main results showed that both indices presented similar spatial patterns, with areas farther from urban centers being the most vulnerable. With the inclusion of technological factors, low vulnerability areas decreased, while high vulnerability areas increased. It was possible to identify urban areas with high vulnerability in Caruaru and Escada. The inclusion of technological factors in flood vulnerability analysis offers a comprehensive understanding and can guide actions aimed at reducing vulnerability in critical areas.

KEYWORDS: Sustainability, Hydrological disasters, Spatial Analysis, Climate change.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação de enchentes, inundações e alagamentos.	22
Figura 2 - Ocorrências de desastres de ordem hidrológica em Pernambuco (2000 a 2024). ...	26
Figura 3 – a) Caruaru em estado de emergência após chuvas que ocorreram mesmo no período de seca. b) Moradores da comunidade Jardim Monte Verde cobram obras de reparo e prevenção de desastres.....	26
Figura 4 – Tipos de medidas de controle de enchentes adaptado de Aluísio Pardo Canholi (2014).	28
Figura 5 – Percurso metodológico.....	32
Figura 6 – Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca.	33
Figura 7 – Áreas de desenvolvimento da BHRI.	35
Figura 8 – Mapa de localização dos municípios do estudo.	36
Figura 9 – Critérios da Revisão Integrativa.....	38
Figura 10 – Síntese dos indicadores.	40
Figura 11 – População por setor censitário (IBGE).	41
Figura 12 – Dependentes por setor censitário (IBGE).	42
Figura 13 – Pobreza por setor censitário (IBGE).	43
Figura 14 – Educação por setor censitário (IBGE).....	44
Figura 15 – Renda por setor censitário (IBGE).....	45
Figura 16 – Precipitação média anual (1977 a 2006).	46
Figura 17 – Proximidade com rios.	47
Figura 18 – Declividade (classes da Embrapa).	48
Figura 19 - Elevação.....	49
Figura 20 – Tipos de solos.....	50
Figura 21 – Uso do solo.....	51
Figura 22 – Trechos inundáveis (ANA).	52
Figura 23 – Infraestrutura (Estradas).....	53
Figura 24 – Unidades de saúde.....	54
Figura 25 – Escolas.	55
Figura 26 – Área de concentração urbana do município de Bezerros.	62
Figura 27 – Área de concentração urbana do município de Caruaru.	62
Figura 28 – Área de concentração urbana do município de Escada.....	63
Figura 29 – Área de concentração urbana do município de Sanharó.	63

Figura 30 – Variável de sensibilidade social: dependentes.	64
Figura 31 – Variável de sensibilidade social: pobreza.	65
Figura 32 – Variável de capacidade de adaptação social: renda.	66
Figura 33 – Variável de capacidade de adaptação social: educação.	67
Figura 34 – Indicador de Vulnerabilidade Social.	68
Figura 35 – Variável de exposição ambiental: precipitação.	69
Figura 36 – Variável de exposição ambiental: distância de recursos hídricos.	70
Figura 37 – Variável sensibilidade ambiental: declividade.	71
Figura 38 – Variável sensibilidade ambiental: declividade.	72
Figura 39 – Variável de capacidade de adaptação ambiental: tipos de solos.	73
Figura 40 – Variável de capacidade de adaptação ambiental: uso e cobertura do solo.	74
Figura 41 – Indicador de Vulnerabilidade Ambiental.	75
Figura 42 – Variável de exposição tecnológica: trechos inundáveis.	76
Figura 43 – Variável de sensibilidade tecnológica: infraestrutura.	77
Figura 44 – Variável de capacidade de adaptação tecnológica: serviços de emergência.	78
Figura 45 – Variável de capacidade de adaptação tecnológica: capacidade de abrigo.	79
Figura 46 – Indicador de Vulnerabilidade Tecnológica.	80
Figura 47 – Índice de vulnerabilidade socioambiental.	83
Figura 48 - Índice de vulnerabilidade integrado.	83
Figura 49 - Áreas mais vulneráveis em Caruaru.	85
Figura 50 - Áreas mais vulneráveis em Escada.	85
Gráfico 1 – Percentual de contribuição nos danos e prejuízos por grupo de desastres.	24
Gráfico 2 - Precipitação acumulada mensal do ano de 2023.	34
Gráfico 3 – Dimensões da vulnerabilidade analisadas nos estudos selecionados.	39
Gráfico 4 – Percentuais de classes de vulnerabilidade para o Indicador Social.	68
Gráfico 5 – Percentuais de classes de vulnerabilidade para o Indicador Ambiental.	75
Gráfico 6 – Percentuais de classes de vulnerabilidade para o Indicador Tecnológico.	80
Quadro 1 - Classificação e Codificação Brasileira de Desastres.	23
Quadro 2 – Principais eventos de inundação ocorridos no estado de Pernambuco entre 2000 e 2022.	25
Quadro 3 – Municípios selecionados para o estudo.	36
Quadro 4 – Variáveis do Indicador Social.	40

Quadro 5 – Variáveis do Indicador Ambiental.....	46
Quadro 6 – Variáveis Tecnológicas.	52
Quadro 7 – Normalização e Classificação das variáveis sociais.	56
Quadro 8 – Normalização e Classificação das variáveis ambientais e tecnológicas.....	57
Quadro 9 – Normalização e Classificação das variáveis tecnológicas.....	58
Quadro 10 – Variáveis agrupadas.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de áreas por classe de vulnerabilidade (IVSA).....	81
Tabela 2 – Relação de áreas por classe de vulnerabilidade (IVSAT).	81
Tabela 3 – Resultado Índice de Moran Global.	82

LISTA DE ABREVIATURAS

AA	Alto-Alto
AB	Alto-Baixo
ANA	Agência Nacional de Águas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Climas
BA	Baixo-Alto
BB	Baixo-Baixo
BHRI	Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca
CONDEPE/FIDEM	Agência Estadual de Planejamento e Pesquisa de Pernambuco
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FBDS	Fundação Brasileira Para o Desenvolvimento Sustentável
GL3	Grupo de Bacias de Pequenos Rios Interiores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística
INEP	Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
IVSA	Índices de Vulnerabilidade Socioambiental
IVSAT	Índice de Vulnerabilidade Integrado com Fatores Tecnológicos
LISA	Local Indicator for Spatial Autocorrelation
mm	Milímetro
OECD	Organização Para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PERH-PE	Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco
PHA	Plano Hidroambiental
RMR	Região Metropolitana do Recife
SIG	Sistema de Informações Geográficas
UPA	Unidade de Pronto Atendimento
UP5	Unidade de Planejamento Hídrico de Pernambuco 5

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	OBJETIVO GERAL.....	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
4.1	VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL.....	20
4.2	INUNDAÇÃO - DEFINIÇÕES E ESTUDO DE CASO	21
4.3	O DOMÍNIO TECNOLÓGICO	28
4.3.1	O QUE SÃO FATORES TECNOLÓGICOS?	29
4.3.2	FATORES TECNOLÓGICOS E VULNERABILIDADE A INUNDAÇÕES.....	30
5	METODOLOGIA	32
5.1	DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	32
5.2	IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS PARA ANÁLISE DA VULNERABILIDADE A INUNDAÇÃO	38
5.3	PROPOSTA DE INDICADORES PARA ANÁLISE DA VULNERABILIDADE A INUNDAÇÃO.....	40
5.3.1	INDICADOR SOCIAL.....	40
5.3.2	INDICADOR AMBIENTAL	45
5.3.3	INDICADOR TECNOLÓGICO.....	51
5.4	CÁLCULO DOS INDICADORES	56
5.5	METODOLOGIA DE ANÁLISE ESPACIAL	59
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
6.1	INDICADORES DE VULNERABILIDADE A INUNDAÇÃO.....	61
6.1.1	INDICADOR SOCIAL.....	61
6.1.2	INDICADOR AMBIENTAL	69
6.1.3	INDICADOR TECNOLÓGICO.....	76
6.2	CÁLCULO DA VULNERABILIDADE E ANÁLISE ESPACIAL.....	81
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	86
	REFERÊNCIAS	88

1 INTRODUÇÃO

Desastres de ordem hidrológicas, como inundações, estão entre os mais comuns no Brasil, e embora relacionados a eventos naturais, diversos fatores são apontados como agravantes do risco de inundações, tais como: o uso descontrolado da terra, a rápida urbanização, a degradação ambiental e o agravamento das condições de pobreza (Tasantb, 2019). Estas condições, aliadas aos riscos naturais, influenciam na capacidade de prevenção, enfrentamento e recuperação frente ao desastre, tornando áreas de concentração urbanas vulneráveis a condições hidrológicas extremas (Cho; Chang, 2017).

No Brasil, entre 2010 e 2019, inundações deixaram cerca de 10 milhões de pessoas desabrigadas e desalojadas, com um prejuízo (público e privado) de 7,5 bilhões de reais (INMET, 2021). No mundo, esse valor excede 40 bilhões de dólares anualmente e afeta milhões de pessoas (OECD, 2016). O relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) aponta que, até 2050, 68% da população mundial poderá ser urbana e mais pessoas deixarão suas casas por desastres relacionados ao clima, especialmente inundações (IPCC, 2022).

Embora esta seja uma questão global, um evento de inundação pode afetar comunidades de uma forma mais severa do que a outras. Isso porque os impactos de inundações estão ligados ao encontro de um evento adverso de causas naturais com um ecossistema vulnerável (Freire; Bonfim; Natenzon, 2014). Ou seja, são as características de cada população que vão influenciar o quanto ela está vulnerável, como a carência de infraestrutura, condições econômicas e sociais, falta de políticas ou aplicação da legislação ambiental e urbana, e seu processo de urbanização (Fragoso; Silva, 2019).

O conceito de vulnerabilidade busca descrever como um evento catastrófico tem diferentes impactos nos elementos expostos ao risco, ou seja, a população e a infraestrutura (Hamidi *et al.*, 2020). Este conceito tem sido significativo e urgente para gestão de desastres e mudanças climáticas, pois fornece ferramentas de análise de riscos, impotência e marginalidade dos sistemas físicos e sociais, visando reduzir os danos e melhorar a qualidade de vida (Cho; Chang, 2017).

A vulnerabilidade como função da exposição, sensibilidade e adaptabilidade foi apresentada pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2007*) e tem sido adotada por diversos estudos (Aktar *et al.*, 2021; Chang *et al.*, 2021a; Cho; Chang, 2017; Hamstead; Sauer, 2021; Turner *et al.*, 2003). Esta estrutura conceitual com três dimensões possibilita, ao mesmo tempo, padronização e adoção

de diferentes indicadores e variáveis para considerar as características de cada região. A abordagem baseada em indicadores permite uma visão detalhada da vulnerabilidade global a inundação de cada região, sendo de grande valor para gestão de risco (Aktar *et al.*, 2021).

A exposição tem relação com o risco experimentado pela entidade e pode ser expressa pela quantidade de indivíduos ou estruturas expostas, para isso deve ser considerado sua localização e condições físicas e temporais (Andrade; Szlafsztajn, 2018). A sensibilidade diz respeito a como é provável que a comunidade seja afetada, e deve ser relacionada com suas características internas, como fatores socioeconômicos. E a capacidade de adaptação ou adaptabilidade, é o potencial de ajuste sob a influência do perigo para reduzir seus impactos, também entendida como resiliência (Chang *et al.*, 2021a; Hamidi *et al.*, 2020).

Sendo assim, a vulnerabilidade inclui aspectos multilaterais em suas dimensões e não deve ser estudada isolada de aspectos socioeconômicos e ambientais (Cho; Chang, 2017). Na literatura, a vulnerabilidade está presente como um conceito multidimensional, que integra contextos socioeconômico, demográfico, físico, natural, cultural e institucional da população (Adeleye *et al.*, 2019; Freire; Bonfim; Natenzon, 2014; Guimarães *et al.*, 2014; Hamidi *et al.*, 2020; Salami; Von Meding; Giggins, 2017). Para uma melhor avaliação é importante incluir neste conceito, os aspectos tecnológicos que podem colaborar aumentando ou diminuindo a vulnerabilidade (Markolf *et al.*, 2018).

Os fatores tecnológicos envolvem as interações entre pessoas, organizações, instituições e tecnologias, nele estão os componentes e aspectos associados aos sistemas urbanos, como estradas, transportes públicos, geração e distribuição de energia, saneamento, construções e o conhecimento incorporado em tecnologias (Grabowski *et al.*, 2017; Markolf *et al.*, 2018). A sustentabilidade de uma área pode ser influenciada pelos fatores tecnológicos (Bixler *et al.*, 2019) e é devido à natureza complexa desse fenômeno, que é necessário avaliar a relação entre a presença dessas tecnologias e a redução da vulnerabilidade socioambiental de áreas afetadas por inundações (Ahlborg *et al.*, 2019).

Estudos apontam a importância de incluir os aspectos tecnológicos, mesmo que haja dificuldade para identificar e mensurar esses fatores, entendendo a sociedade e a tecnologia como mutuamente constitutiva (Andrade; Szlafsztajn, 2018; Grabowski *et al.*, 2017). Ainda assim, poucos estudos consideram os três domínios (Social, Ambiental e Tecnológico) de forma descompactada, o que ajuda a identificar efetivamente os fatores interseccionais de vulnerabilidade (Sauer *et al.*, 2023) e desta forma colaborar para a formulação de políticas e ações interdisciplinares que façam frente ao desafio de forma eficaz, realista e sistêmica.

Em Pernambuco, diversos municípios da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca (BHRI) foram atingidos por inundações em diferentes anos, como 2000, 2004, 2005, 2010, 2011 e 2017, e em anos mais recentes entre 2019 e 2022 (Ferraz, 2019; Fragoso; Silva, 2019; Silva, 2019). Os municípios de Bezerros, Caruaru, Escada e Sanharó foram selecionados de acordo com os eventos sofridos nas últimas duas décadas, suas localizações em diferentes unidades de análise do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco (PERH-PE) para BHRI e a classificação de vulnerabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA).

Neste contexto, o estudo propõe analisar a vulnerabilidade socioambiental a inundações com a inclusão de fatores tecnológicos para quatro municípios BHRI em Pernambuco. Para definir os fatores socioambientais e tecnológicos da pesquisa, foi realizada uma revisão integrativa de literatura. Os dados que compõem os indicadores foram obtidos de diversas fontes e bancos de dados governamentais. Esses dados foram tratados com ferramentas de Sistema de Informações Geográficas, padronizados e organizados em um banco de dados próprio. A partir deles, realizou-se uma análise espacial para compor os índices, permitindo entender melhor como os fatores tecnológicos contribuem para a vulnerabilidade a inundações.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral analisar a vulnerabilidade socioambiental a inundações com a inclusão de fatores tecnológicos para quatro municípios da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar as variáveis relevantes para análise de vulnerabilidade a inundações;
- Propor indicadores ambientais, sociais e tecnológicos para análise da vulnerabilidade a inundações;
- Analisar os índices de vulnerabilidade socioambiental (IVSA) e de vulnerabilidade socioambiental com a inclusão de fatores tecnológicos (IVSAT) dos municípios em relação às inundações.

3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho foi estruturado em tópicos, sendo o primeiro referente à introdução, seguido pelos objetivos e descrição da estrutura. O tópico quatro destinou-se a apresentar a fundamentação teórica, que compreende a base conceitual da pesquisa. O quinto tópico, compreende a caracterização da área de estudo e o percurso metodológico adotado. Os resultados foram descritos no tópico seis, ou seja, a apresentação dos índices, mapas gerados e discussões. E, por fim, as conclusões da pesquisa foram apresentadas no sétimo tópico, seguido das referências da dissertação.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A base teórica foi desenvolvida por meio da revisão de literatura, conduzida por uma busca dos trabalhos essenciais com foco em identificar o desenvolvimento atual dos conceitos utilizados na pesquisa, eventos históricos relacionados à área de estudo e o que tem sido adotado em termos metodológicos. Desta forma, serão apresentados os conceitos de Vulnerabilidade Socioambiental, principais abordagens e os principais fatores determinantes. Esta seção também aborda conceitos relacionados a inundações, como causas e consequências, e as principais ocorrências na área de estudo.

4.1 Vulnerabilidade Socioambiental

Como os desastres naturais afetam a população ou o sistema depende de diferentes condições e aspectos (Hamidi *et al.*, 2020), os impactos resultantes estão relacionados à magnitude e frequência do fenômeno causador; no entanto, sua gravidade deriva das condições de vulnerabilidade do receptor (Guimarães *et al.*, 2014). A vulnerabilidade é preexistente ao acontecimento e resulta da cumulatividade de fatores naturais, processos sociais e mudanças ambientais. As características da população e do meio influenciam na capacidade de reação e recuperação da comunidade a um evento (Freire; Bonfim; Natenzon, 2014).

Portanto, o estudo da vulnerabilidade está presente na literatura nacional e internacional como um conceito multidimensional, que integra contextos socioeconômico, demográfico, físico, natural, cultural e institucional da população (Adeleye *et al.*, 2019; Freire; Bonfim; Natenzon, 2014; Guimarães *et al.*, 2014; Hamidi *et al.*, 2020; Salami; Von Meding; Giggins, 2017). Os fatores naturais referem-se aos fenômenos espontâneos ou tecnicamente manipulados. Os processos sociais constituem os aspectos socioeconômicos da população, como gênero, idade, saúde, educação, trabalho, renda, saneamento e habitação. E as mudanças ambientais resultam da degradação, por exemplo o desmatamento de encostas e leitos de rios (Freire; Bonfim; Natenzon, 2014; Guimarães *et al.*, 2014).

Vários estudos consideram exposição, sensibilidade e adaptabilidade, como as três dimensões que formam a estrutura conceitual de vulnerabilidade. A vulnerabilidade como função da exposição, sensibilidade e adaptabilidade foi apresentada pelo IPCC (2007) e esta estrutura conceitual com três dimensões têm sido amplamente adotadas (Lee, Choi. 2018; Aktar *et al.*, 2021; Chang *et al.*, 2021a; Cho; Chang, 2017; Hamstead; Sauer, 2021; Turner *et al.*, 2003). Esta estruturação é essencial para compreensão das particularidades dos eventos ocorridos nos municípios analisados neste estudo.

A dimensão da **exposição** tem relação com o risco experimentado pela entidade e é baseado na localização e nas condições físicas e temporais. A **sensibilidade** diz respeito a como é provável que a comunidade seja afetada, de acordo com suas características internas. E a **adaptabilidade** ou capacidade de adaptação, é o potencial de ajuste sob a influência do perigo para reduzir seus impactos, também entendida como resiliência (Chang *et al.*, 2021a; Hamidi *et al.*, 2020).

Esta avaliação da vulnerabilidade é crucial para entender como diferentes comunidades ou setores, que são sistemas complexos e integrados, serão impactados pelos eventos extremos e o quanto são resilientes (Kim *et al.*, 2021). Exposição, sensibilidade e adaptabilidade são elementos interdependentes que, quando analisados em conjunto, fornecem uma visão abrangente das consequências climáticas potenciais. Esta abordagem integrada permite que formuladores de políticas desenvolvam estratégias mais eficazes de adaptação e mitigação, aumentando a resiliência das comunidades e ecossistemas (IPCC, 2007).

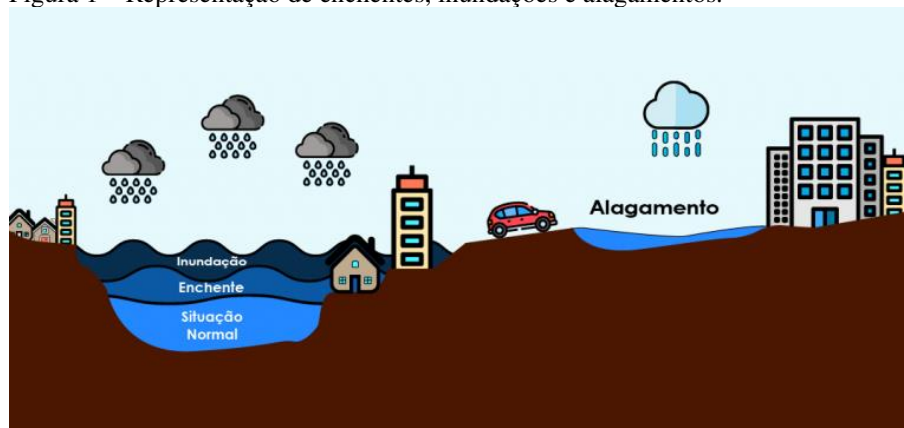
As pesquisas desenvolvidas na área ajudam a reduzir a incerteza nos cenários e projeções, e promovem um melhor entendimento da vulnerabilidade a inundação (Cho; Chang, 2017). A evolução dos conceitos e dos métodos para avaliação da vulnerabilidade permite fornecer informações para tomada de decisão e adoção de medidas para proteção, identificando fatores de riscos, as áreas vulneráveis e as ações para mitigar os impactos sobre ele (Freire; Bonfim; Natenzon, 2014).

O conceito de vulnerabilidade, quando aplicado separadamente a aspectos sociais, econômicos ou ambientais, pode desconsiderar a complexidade do ecossistema no qual se manifesta. Como os processos de exposição, sensibilidade e adaptabilidade afetam e são afetados pelos componentes sociais, ecológicos e tecnológicos, de forma interdependente, é útil abordar esses componentes integrados (Chang *et al.*, 2021b).

4.2 Inundação - Definições e estudo de caso

O aumento temporário da vazão em um curso d'água é um processo natural, chamado de enchente, que pode ser causado por um período de precipitação excessiva, rápido acúmulo e aumento do escoamento para o canal. Quando esse aumento extravasa para áreas em torno das margens do rio é chamado de inundação. Nessa situação, o escoamento da água acaba sendo prejudicado e podem ocorrer alagamentos em áreas que normalmente não tem presença de água (Figura 1) (Ouma; Tateishi, 2014).

Figura 1 – Representação de enchentes, inundações e alagamentos.



Fonte: Ilha do conhecimento, 2022.¹




A elevação do nível de água em um rio pode causar situações de riscos e grandes danos quando este volume extravasa da calha do rio e se acumula em áreas que não ficam submersas naturalmente (Hamidi *et al.*, 2020). Sobretudo, quando no local se encontram elementos relacionados à ação humana, como construções residenciais, comerciais, industriais e de circulação (Silva; Barbosa, 2018).

A Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE) categoriza os desastres quanto a sua causa, podendo ser natural ou tecnológicos. O código é utilizado principalmente pela defesa civil e órgãos relacionados a gestão de risco. Ele serve para padronizar a comunicação e organização de informações sobre desastres, facilitando também a coordenação de respostas emergenciais e o planejamento de ações.

As inundações são classificadas como desastres causados por agentes primários de ordem natural e fazem parte do grupo dos desastres hidrológicos, junto com as enxurradas e alagamentos (Quadro 1). Sendo as inundações os desastres em maiores escalas e os mais destrutivos (Ramos Filho, 2022).

¹ Retirado do site: <https://ilhadoconhecimento.com.br/enchentes-e-deslizamentos/>

Quadro 1 - Classificação e Codificação Brasileira de Desastres.

	GRUPO	SUBGRUPO	TIPO	SUBTIPO	DEFINIÇÃO	COBRADE	SIMBOLOGIA
1. NATURAIS	2. Hidrológico	1. Inundações	0	0	Submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas. O transbordamento ocorre de modo gradual, geralmente ocasionado por chuvas prolongadas em áreas de planície.	1.2.1.0.0	
		2. Enxurradas	0	0	Escoamento superficial de alta velocidade e energia, provocado por chuvas intensas e concentradas, normalmente em pequenas bacias de relevo acidentado. Caracterizada pela elevação súbita das vazões de determinada drenagem e transbordamento brusco da calha fluvial. Apresenta grande poder destrutivo.	1.2.2.0.0	
		3. Alagamentos	0	0	Extrapolação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem urbana e consequente acúmulo de água em ruas, calçadas ou outras infraestruturas urbanas, em decorrência de precipitações intensas.	1.2.3.0.0	

Fonte: BRASIL, 2012.

As inundações podem ser caracterizadas como chuvas intensas em uma bacia hidrográfica pequena (área menor que 100 Km²) e apesar de suas causas terem relações com fatores naturais, as ações antrópicas também colaboram para suas ocorrências e potencial para causar danos (Ouma; Tateishi, 2014).

Áreas com altas taxas de impermeabilização do solo, ocupações irregulares, barreiras ou obstruções para a drenagem, como construções e resíduos sólidos, aumentam o escoamento superficial para o corpo d'água (Silva; Barbosa, 2018), colaborando com a falha do sistema de drenagem.

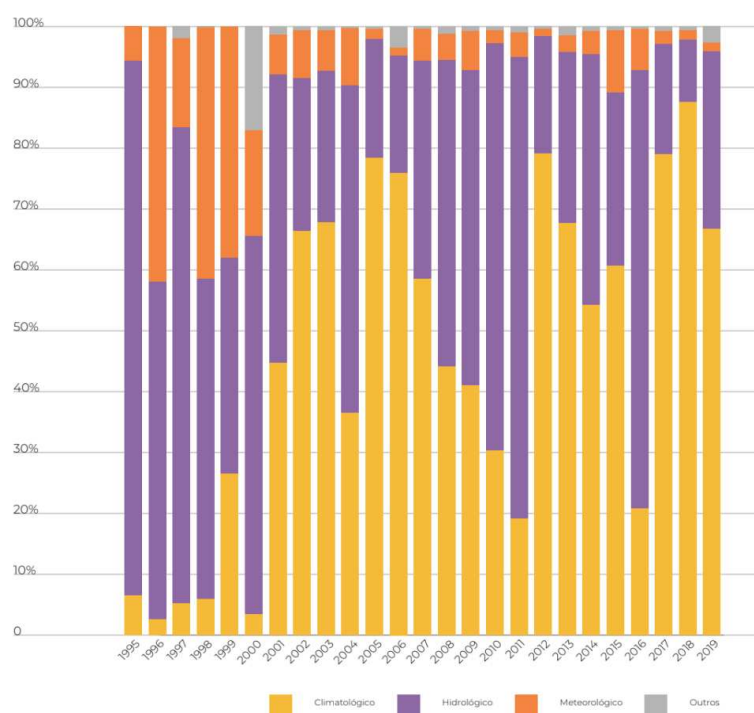
Desta forma, o processo de urbanização está relacionado com a frequência e magnitude de inundações. A urbanização pode ser definida como a conversão de terras naturais ou agrícolas em ambiente construído (Ouma; Tateishi, 2014). O acelerado processo de urbanização sem planejamento adequado, possibilita o surgimento de moradias em áreas inadequadas, sem infraestrutura ou acesso aos serviços básicos.

As características socioeconômicas da população de uma área sujeita a um processo de segregação socioespacial fazem com que os impactos de uma inundação sejam diferentes para determinada comunidade, podendo ser afetada com mais intensidade, devido à exposição aos riscos ambientais e às suas condições de fragilidade (Hamidi *et al.*, 2020; Santos, 2012).

No Brasil, as inundações estão relacionadas aos desastres naturais que mais ocorrem e são agravadas pela falta de infraestrutura ou planejamento urbano adequados (Buffon; Goudard; Mendonça, 2017). As consequências destes eventos são danos ao patrimônio público e privado, pessoas desabrigadas ou desalojadas, riscos à saúde e perda de vidas humanas.

O “Relatório de Danos Materiais e Prejuízos decorrentes de Desastres Naturais no Brasil”, publicado em 2020², apontou que entre os anos de 1995 e 2019, o País teve um prejuízo de R\$ 333,36 bilhões em 32.832 registros decorrentes de desastres. Destes, os desastres hidrológicos, como inundações, enxurradas, alagamentos e chuvas intensas, tiveram uma média anual de R\$ 4,60 bilhões em danos e prejuízos e foram predominantes nas décadas de 1990 e 2000 (Gráfico 1) (Banco Mundial, 2020).

Gráfico 1 – Percentual de contribuição nos danos e prejuízos por grupo de desastres.



Fonte: Banco Mundial, 2020.

Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), dentre os desastres naturais ocorridos entre 2010 e 2019, inundações foram responsáveis pelo maior número de pessoas desabrigadas e desalojadas, cerca de 10 milhões de vidas afetadas em 1.899 ocorrências e em torno de R\$ 7,5 bilhões em prejuízos (público e privado) em todo Brasil (INMET, 2021).

O estado de Pernambuco possui um histórico de desastres com grandes prejuízos materiais, financeiros e de vidas (Quadro 2). Algumas regiões, como a Mata Sul e o Agreste Pernambucano (Figura 3a), sofreram com a intensificação de enchentes e inundações no período de 2000 a 2010 (Fragoso; Silva, 2019; Silva, 2019). Na década seguinte, de 2010 a 2020, outras catástrofes atingiram a região deixando diversos municípios em situação de

² Elaborado pelo Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (Ceped-UFSC) e atualizado pela Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária de Santa Catarina (FAPEU/SC).

emergência ou calamidade pública (Ferraz, 2019). Os eventos de maiores proporções aconteceram em 2000, 2004, 2005, 2010, 2011 e 2017 (Silva, 2019), afetando vários municípios.

Quadro 2 – Principais eventos de inundação ocorridos no estado de Pernambuco entre 2000 e 2022.

Ano	Descrição do evento	Fonte
2000	33 municípios da RMR e da Mata Sul foram atingidos, 16 declararam estado de emergência e 17 estado de calamidade pública.	SILVA, 2019
2004	Chuvas atípicas nos meses de janeiro e fevereiro deixaram 13 cidades em estado de calamidade pública e 66 em estado de emergência em todo estado.	SILVA, 2019
2005	25 cidades do agreste, Zona da Mata e do Litoral pernambucanos atingidas, foram cerca de 30 mil desabrigados. Houve o transbordamento do Rio Ipojuca, causando inundações em Escada e Pombos.	FERRAZ, 2019 GOMES, 2018 SILVA, 2019
2010	Alagoas e Pernambuco tiveram 30 municípios afetados, só em Pernambuco foram 80 mil desabrigados em cidades do Agreste, entre elas Agrestina, Altinho, Amaraji, Belo Jardim, Bezerros, Cachoeirinha, Chã Grande, Escada, Gravatá, Primavera, Pombos e Sairé.	FRAGOSO, 2013 FERRAZ, 2019 SILVA, 2019
2011	Cerca de 145 mil pessoas afetadas na RMR e Zona da Mata com 48 cidades inundadas, 26 em estado de emergência, entre elas o município de Escada.	FRAGOSO, 2013 FERRAZ, 2019 SILVA, 2019
2017	Aproximadamente 45 mil pessoas desabrigadas ou desalojadas em 23 municípios da Zona da Mata e do Agreste pernambucano. 14 municípios em estado de calamidade pública e a cidade de Caruaru em estado de emergência.	Agência Brasil, 2017 ³
2022	Pior tragédia causada por chuvas no estado com 133 mortos e mais de 120 mil pessoas afetadas nas cidades Recife e Jaboatão dos Guararapes. Na Zona da Mata, muitas casas foram invadidas pela água em Goiana e Macaparana.	G1 PE, 2024 ⁴

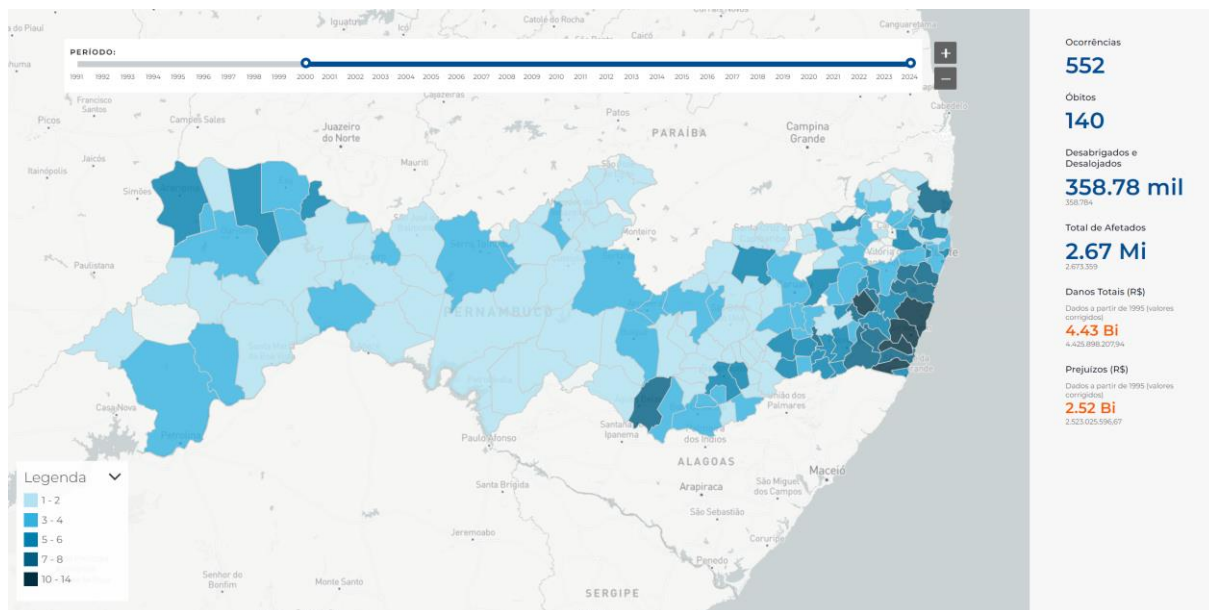
Fonte: Autora (2024).

O Atlas Digital de Desastres no Brasil (Brasil, 2024), registrou entre os anos de 2000 e 2024, 552 ocorrências de desastres de ordem hidrológicas (inundação, enchente e enxurrada) em Pernambuco, resultando em 358,78 mil pessoas desabrigadas ou desalojadas e uma população afetada de 2,67 milhões de pessoas (Figura 2). Nesse período, o Atlas tem registro de 140 óbitos no estado, o que pode significar uma divergência ou subnotificação dos dados, pois em 2022 registrou-se 133 mortos apenas em Recife e Jaboatão.

³ Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2017-05/com-44-mil-pessoas-afetadas-municipios-de-pe-contabilizam-prejuizos-apos#>. Acesso em: 24 fev. 2022.

⁴ Retirado da reportagem do dia 28/05/2024, disponível em: <https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2024/05/28/dois-anos-apos-tragedia-das-chuvas-com-133-mortos-mais-de-2-mil-pessoas-ainda-nao-voltaram-para-casa.ghtml>.

Figura 2 - Ocorrências de desastres de ordem hidrológica em Pernambuco (2000 a 2024).



Fonte: Atlas Digital de Desastres no Brasil (Brasil, 2024).

A catástrofe ocorreu em 28 de maio de 2022, foi o pior desastre ambiental causado por chuvas no estado de Pernambuco. Foram 133 mortos nas cidades de Recife e Jaboatão dos Guararapes, entre os dias 25 de maio e 7 de junho, e mais de 120 mil pessoas afetadas, incluindo municípios da Zona da Mata Pernambucana. A comunidade de Jardim Monte Verde em Jaboatão registrou 17 mortos em uma mesma rua e, após dois anos, mais de 2 mil pessoas não retornaram para suas casas e recebem auxílio moradia (Figura 3b) (G1 PE, 2024).

Figura 3 – a) Caruaru em estado de emergência após chuvas que ocorreram mesmo no período de seca. b) Moradores da comunidade Jardim Monte Verde cobram obras de reparo e prevenção de desastres.



Fonte: G1 PE, 2017⁵.

⁵ Imagens retiradas das reportagens dos dias 03/06/2017 e 28/05/2024 respectivamente. Disponível em: <https://g1.globo.com/pe/caruaru-regiao/noticia/18-cidades-de-alagoas-e-pernambuco-estao-em-emergencia-pela-seca-e-tambem-pelas-chuvas.ghtml> e <https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2024/05/28/dois-anos-apos-tragedia-das-chuvas-com-133-mortos-mais-de-2-mil-pessoas-ainda-nao-voltaram-para-casa.ghtml>.

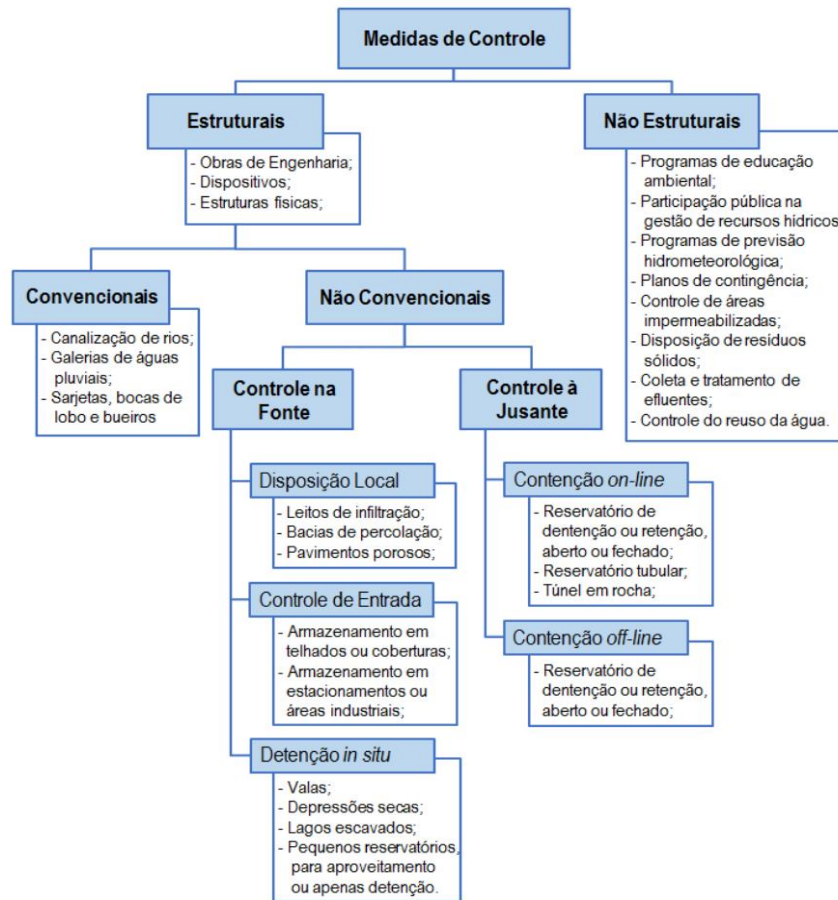
Desastres, como os que ocorreram em Pernambuco nas últimas décadas, configuram um problema global, entretanto, quando ocorrem, podem afetar mais intensamente um grupo populacional que outro (Freire; Bonfim; Natenzon, 2014). Os danos materiais, ambientais e humanos de uma inundação decorrem da coexistência de condições socioeconômicas da comunidade e sua exposição a fatores ambientais, sendo chamada de vulnerabilidade.

A redução do risco de um desastre faz uso de diversos processos associados com estruturas físicas, sociais e econômicas, que representam ajustes nos sistemas naturais e humanos e promovem adaptação às situações adversas (Buffon; Goudard; Mendonça, 2017). Quando são identificadas as áreas ou populações em situação de risco e vulnerabilidade é possível adotar políticas, estratégias e práticas que podem prevenir, mitigar e preparar para os impactos de um evento extremo (Tasantab, 2019).

As ações realizadas com objetivo de controle de enchentes podem ser divididas em medidas estruturais e não estruturais (Figura 4). A integração delas é essencial para uma abordagem eficaz de prevenção e mitigação de inundações e suas consequências (Bomtempo Filho, 2017). As medidas estruturais são aquelas que fazem uso de soluções de engenharia, como obras de infraestrutura urbana no geral, realocação de moradias, construção de barragens, canais ou estruturas de retenção e utilização de tecnologias para monitoramento, previsão e alerta (Canholi, 2014).

As medidas não estruturais estão relacionadas a estratégias aplicadas para redução do risco e dos impactos. Podem ser ferramentas de gestão e planejamento público, criação e aplicação de legislações e planos, monitoramento e educação da população (Canholi, 2014). Essas medidas não envolvem obras de engenharia e por isso têm custos menores que medidas estruturais; porém, muitas vezes, sua eficácia depende da aplicação contínua e permanente dessas ferramentas.

Figura 4 – Tipos de medidas de controle de enchentes adaptado de Aluísio Pardo Canholi (2014).



Fonte: Setti (2016).

As estratégias de prevenção e mitigação dos impactos devastadores das inundações estão ligadas aos recursos e à capacidade tecnológica, como as medidas anteriormente citadas. Integrar recursos e inovações tecnológicas na gestão de riscos de inundações pode não apenas reduzir a vulnerabilidade, mas também aumentar significativamente a resiliência das comunidades afetadas (Bomtempo Filho, 2017).

4.3 O domínio tecnológico

Os fatores tecnológicos desempenham um papel crucial na compreensão e na mitigação da vulnerabilidade em sistemas socioambientais. Esses fatores referem-se à aplicação de conhecimento científico, técnicas, ferramentas, infraestruturas e serviços para lidar com os impactos das inundações e para melhorar a resiliência e a capacidade de adaptação das comunidades afetadas (Alhborg *et al.*, 2019; Leta; Adugna, 2023).

O domínio tecnológico normalmente é o meio pelo qual o sistema social afeta o ambiental; por outro lado, a tecnologia é o principal mecanismo de proteção da sociedade contra

problemas de ordem natural, e ainda podem potencializar os serviços e recursos que o sistema ambiental oferece, além de preservá-lo (Markolf *et al.*, 2018). Portanto, não considerar a influência dos fatores tecnológicos para trazer soluções, avaliar impactos e entender dinâmicas temporais e espaciais é deixar uma grande lacuna na análise.

Para Alhborg *et al.* (2019), as tecnologias têm uma função de mediação entre o ser humano e a natureza, podendo prevenir, mitigar e auxiliar na recuperação frente a um desastre de ordem ambiental. As consequências de eventos extremos, como inundações, vão além dos danos físicos, pois ameaçam a saúde e o bem-estar humano e animal, a economia e causam danos ao meio ambiente, por isso necessitam de uma avaliação complexa.

A análise desses elementos é fundamental para uma compreensão abrangente dos riscos e da capacidade de resposta diante desses eventos extremos. Considerar as tecnologias e infraestrutura e suas relações com os aspectos sociais e ambientais possibilita entender como uma comunidade sem acesso a esses recursos pode se tornar mais vulnerável, ou como torná-las mais resilientes a partir deles (Leta; Adugna, 2023).

A tecnologia já foi vista como autônoma e fora do controle humano, mas, com sua constante evolução, a ciência passou a considerar sociedade e tecnologia como mutuamente constitutiva (Kim *et al.*, 2021). A dimensão tecnológica influencia as dimensões sociais e ambientais, sendo um fator significativo para a sustentabilidade e resiliência (Bixler *et al.*, 2019).

4.3.1 O que são fatores tecnológicos?

Estudos que consideram aspectos tecnológicos no seu escopo costumam destacar instituições e governança (Nilsson; Avango; Rosqvist, 2021), mas o domínio tecnológico também pode ser avaliado através do conhecimento incorporado em tecnologias e componentes construídos pelo homem (Markolf *et al.*, 2018). Bixler *et al.*, (2019). apresentam o domínio tecnológico de forma abrangente, incluindo morfologia urbana, materiais de construções, infraestrutura de transportes, abastecimento, saneamento e drenagem urbana, governança, instrumentos legais, tecnologia da informação e comunicação, sistemas de monitoramento e alerta, e desenvolvimento de pesquisas.

Andrade e Szlafsztain (2018), no estudo sobre a vulnerabilidade da Amazônia a inundações e enchentes, consideraram os componentes tecnológicos como tangíveis e intangíveis. Construções de engenharia, sejam de infraestrutura ou de serviços à população,

representam os componentes tangíveis. Os intangíveis incluem conhecimento, compreensão do risco e sistemas de monitoramento e alerta.

O estudo de Chang *et al.* (2021a), que avaliou a vulnerabilidade a inundações urbanas para seis cidades dos Estados Unidos, utilizou áreas construída e impermeabilizada, infraestruturas críticas - abastecimento, saneamento, energia e estradas -, infraestruturas verdes, centros de emergência e abrigos como fatores para exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação tecnológica.

Para Markolf *et al.* (2018), a inclusão de tecnologias nas análises de vulnerabilidade era uma perspectiva relativamente nova e incipiente. Desde então, diversas pesquisas oferecem uma base para o desenvolvimento de estudos associando componentes tecnológicos como sistemas urbanos, estradas, transportes públicos, geração de energia, saneamento, construções e o conhecimento incorporado em tecnologias (Grabowski *et al.*, 2017; Wesselink; Fritsch; Paavola, 2020; Kim *et al.*, 2021; Chang *et al.*, 2021a).

Estudos como esses trazem uma variedade de perspectivas aplicados à análise de vulnerabilidade, considerando fatores sociais, ambientais e tecnológicos, e são basilares para a construção da metodologia e desenvolvimento desta dissertação. É importante ressaltar que a relação entre os aspectos tecnológicos e a vulnerabilidade socioambiental em relação às inundações pode ser complexa e depende de diversos fatores, como qualidade, disponibilidade, acessibilidade e capacidade de operação e manutenção dessas tecnologias, bem como a capacidade das comunidades em utilizá-las de forma eficaz (Kim *et al.*, 2021).

4.3.2 Fatores tecnológicos e vulnerabilidade a inundações

As tecnologias à serviço da mitigação e prevenção de inundações incluem instrumentos e técnicas que fazem o monitoramento e alerta de riscos, tais como: estações meteorológicas, sensores de chuva, sistemas de previsão hidrometeorológica, sistemas de alerta precoce; estações fluviométricas, acesso a informações, ferramentas de comunicação, como Internet, rádio e tv, e educação sobre riscos e desastres.

O acesso à informação e a educação em relação aos riscos ajuda com a disseminação de informações, possibilitando que a população não só esteja ciente, como também colabore com a prevenção, melhorando a capacidade da comunidade em lidar com um evento de inundação (Andrade; Szlafsztein, 2018).

Os sistemas de monitoramento também podem ajudar na identificação de áreas de risco, tomada de decisão para investimento em ações preventivas e melhora do tempo de resposta em

caso de um evento (Nasiri *et al.*, 2018). São medidas eficazes e que ajudam a salvar vidas e proteger infraestruturas críticas, pois colaboram desde o planejamento até o momento do evento.

Sistemas físicos ou de engenharia, - como sistemas de drenagem, barragens, barreiras de contenção, canalização de rios, reservatórios, dentre outros, - desempenham um papel significativo na prevenção das inundações (Grabowski *et al.*, 2017). Porém, aspectos como transportes, acessos (estradas), hospitais e centros de atendimento de emergência, e locais com capacidade de abrigo, desempenham um papel crucial na resposta, remediação e recuperação dos impactos das inundações (Andrade; Szlafsztein, 2018).

É fundamental analisar criticamente e de forma integrada os aspectos tecnológicos em conjunto com fatores socioambientais, já que são sistemas interconectados (Markolf *et al.*, 2018). A tecnologia promove mudanças no mundo, mas os processos sociais e ambientais também formatam o desenvolvimento tecnológico (Kim *et al.*, 2021).

A abordagem através de indicadores tem sido frequentemente utilizada tanto em pesquisas quanto na gestão de desastres. Índices e indicadores são ferramentas que permitem quantificar e avaliar diferentes situações (Vasconcelos, 2019), no caso da vulnerabilidade, facilita a identificação de áreas mais suscetíveis impactos adversos.

Contudo, para identificar as variáveis que devem ser adotadas, é preciso levar em consideração a disponibilidade de dados para determinada área de estudo. Por fim, a integração desses fatores em análises de vulnerabilidade fornece uma visão mais holística e abrangente, permitindo o planejamento e a tomada de decisões mais eficientes e assertivas para proteger e fortalecer comunidades vulneráveis.

5 METODOLOGIA

A pesquisa proposta fez uso de métodos de pesquisa bibliográfica e de estudo de caso. O delineamento da pesquisa foi feito através da identificação da abordagem teórica e dos fundamentos metodológicos, da definição dos objetivos, da escolha da área de estudo e da seleção das técnicas de coleta e de análise de dados. Estas definições possibilitaram descrever situações, formular hipóteses e conceber explicação sobre as variáveis em relação ao fenômeno. A Figura 5 é uma síntese gráfica da metodologia geral desta dissertação.

Figura 5 – Percurso metodológico.

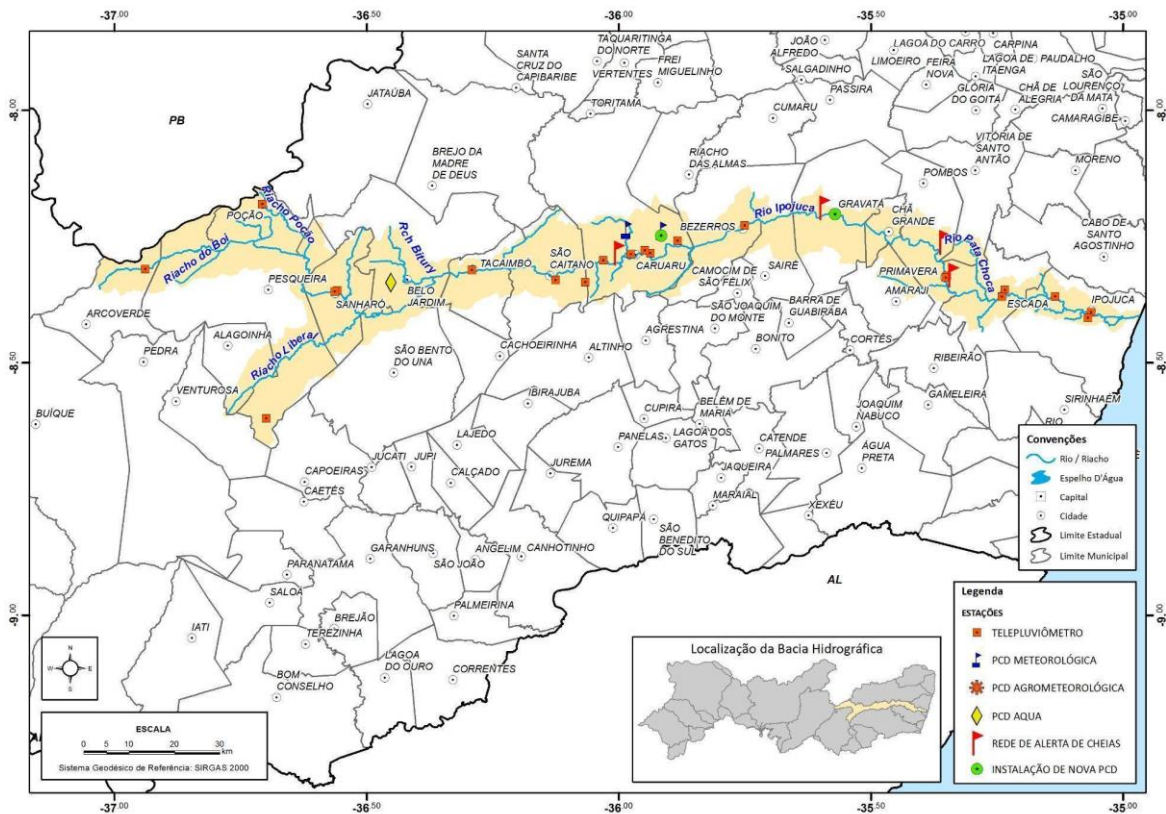


Fonte: Autora (2024).

5.1 Definição e Caracterização da Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca (BHRI) está totalmente localizada no estado de Pernambuco (Figura 6) e possui um formato alongado com 3.435 Km de extensão. A Bacia atravessa o estado, do Sertão à Região Metropolitana do Recife (RMR), tendo municípios localizados no Sertão, Agreste, Mata e Litoral (CONDEPE/FIDEM, 2005). Com a atualização do Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco (PERH/PE), em 2022, a BHRI, que faz parte da Unidade de Planejamento Hídrico 5 (UP5), passou a abranger também o antigo Grupo de Bacias de Pequenos Rios Interiores 3 (GL3), totalizando uma área hidrográfica de 3.587,24 km² em extensão territorial (Pernambuco, 2022).

Figura 6 – Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca.



Fonte: Agência Pernambucana de Águas e Clima - APAC (2022).

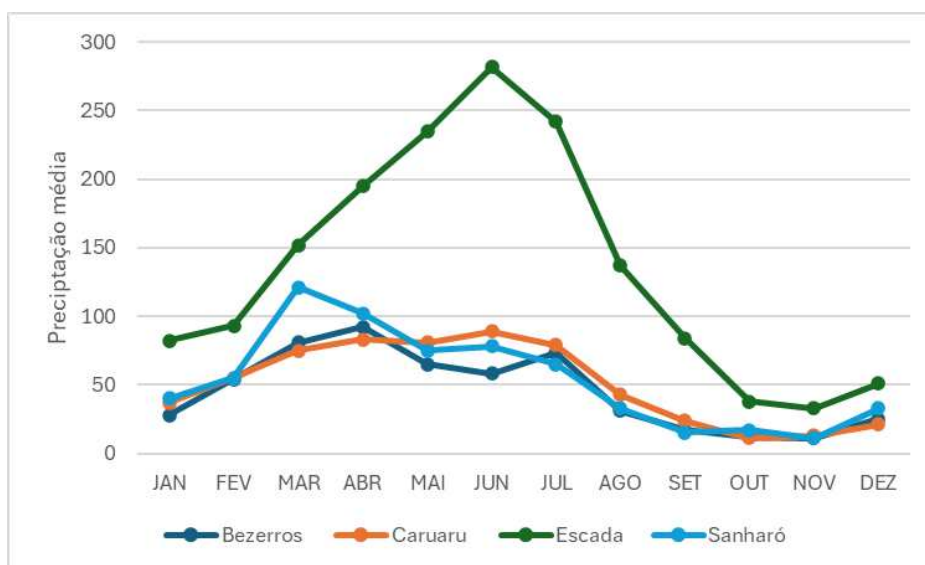
A Bacia possui 24 municípios, dos quais 12 possuem sede na bacia. Seu rio principal, o Rio Ipojuca, tem 323,9 Km de percurso, banhando sedes municipais como: Belo Jardim, Tacaimbó, São Caetano, Caruaru, Bezerros, Gravatá, Primavera, Escada e Ipojuca (Pernambuco, 2022). Sua nascente está no município de Arcoverde a 900 metros de altitude, o Rio segue com regime fluvial intermitente até seu médio curso e torna-se perene entre as áreas pertencentes aos municípios de Gravatá e Chã Grande. Seu curso continua com orientação oeste-leste, até seu estuário ao sul do Porto de Suape, Ipojuca, desaguando no Oceano Atlântico (APAC, 2023).

As características climáticas da BHRI são consideradas intermediárias por estar localizada entre regiões de clima úmido e de clima seco, Zona da Mata, Agreste e Sertão, respectivamente. Isso faz com que cidades da região apresentem clima quente e seco em determinados períodos do ano, e frio e úmido em outros. Na Bacia, a respeito da temperatura média anual, registram-se temperaturas mínimas que flutuam entre 19 °C e 22,5 °C. As médias variam entre 20,5 °C e 23,5 °C, enquanto as máximas entre 29,1 °C e 29,5 °C (Pernambuco, 2022).

Entre janeiro e setembro é comum que as regiões do agreste e sertão tenham acumulados de chuva abaixo ou dentro da climatologia, e a zona da mata, acima. O mês de setembro é considerado mês de período seco em todo estado, com precipitações abaixo de 100 milímetros (mm). Contudo, podem acontecer chuvas isoladas nas regiões do sertão, agreste e zona da mata, principalmente na parte sul, e com isso alguns municípios apresentam um acumulado de chuvas acima da climatologia (APAC, 2023).

No ano de 2023, os municípios de Sanharó, Caruaru, Bezerros e Escada apresentaram um aumento no acumulado de chuvas. Em março, o volume de chuvas ultrapassou os 100 mm para o município de Sanharó. Esse comportamento foi repetido em Escada, porém os índices se mantiveram acima dos 100 mm e continuaram crescendo até o mês de setembro, tendo seu maior valor em julho que acumulou aproximadamente 300 mm de chuvas (Gráfico 2).

Gráfico 2 - Precipitação acumulada mensal do ano de 2023.



Fonte: Autora (2024)⁶.

Essa variação ocorre não só nos diferentes meses do ano, mas a intensidade e volume das chuvas também varia de um ano para outro, de forma que é possível que ocorram chuvas intensas em um período de seca. Esse contexto climático desempenha um papel fundamental na ocorrência de inundações e desastres.

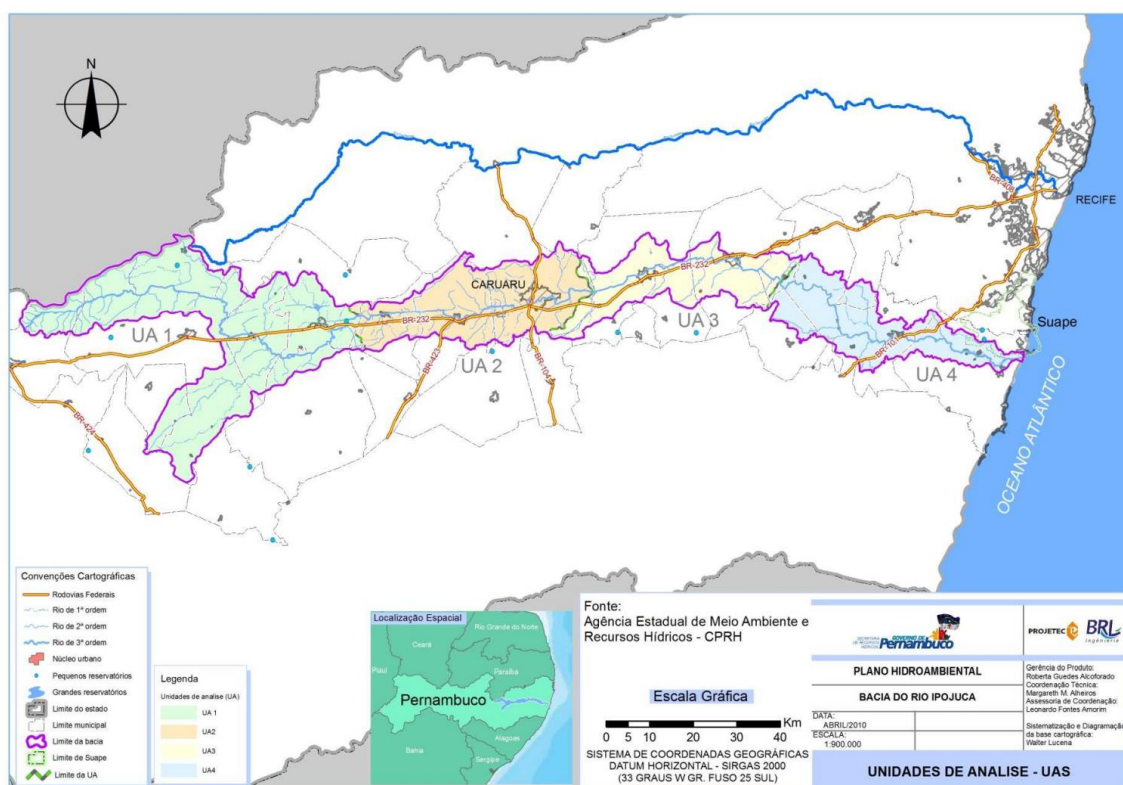
Nesse sentido, a seleção dos municípios foi guiada por critérios climáticos, ambientais e pela exposição ao risco. A combinação desses critérios proporcionou uma abordagem

⁶ Com dados extraídos do site da APAC - Climatologia – Precipitação média por município. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/193-climatologia/521-climatologia-por-municipio>. Acesso em: 01/08/2024.

abrangente e fundamentada para a escolha dos municípios, permitindo uma análise mais completa da vulnerabilidade socioambiental a inundações na bacia hidrográfica do Rio Ipojuca.

O PERH-PE divide a BHRI em quatro áreas de desenvolvimento (Figura 7), de acordo com suas características e para facilitar o desenvolvimento das ações. A localização dos municípios candidatos deste trabalho foi considerada de forma a ter um município de cada uma das áreas de desenvolvimento.

Figura 7 – Áreas de desenvolvimento da BHRI.



Fonte: PERH-PE (Pernambuco, 2010).

Assim, este estudo selecionou diferentes municípios da BHRI para análise da vulnerabilidade a inundações com base nos seguintes critérios:

- Ocorrência de inundações entre 2000 e 2009;
- Ocorrência de inundações entre 2010 e 2019;
- Ocorrência de inundações em 2020/2021;
- Classificação da vulnerabilidade a inundações no mapa da Agência Nacional de Águas (ANA, 2014);
- Ter um município de cada uma das quatro unidades de análise descritas no Plano Hidroambiental (PHA) da bacia hidrográfica do Rio Ipojuca (Pernambuco, 2010).

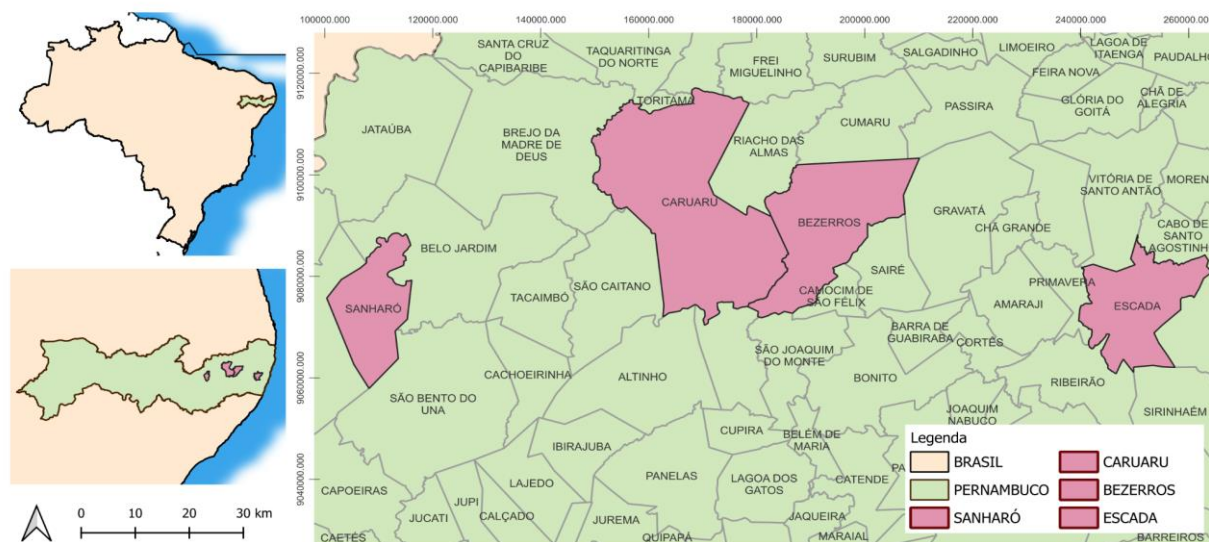
Desta forma, foram selecionados como objeto de análise os municípios de Bezerros, Caruaru, Escada e Caruaru (Quadro 3 e Figura 8). Os quatro municípios possuem diferentes características sociais, econômicas, ambientais e climáticas, possibilitando a análise em diferentes níveis em relação aos fatores que contribuem de forma mais, ou menos, significativa para a vulnerabilidade.

Quadro 3 – Municípios selecionados para o estudo.

Município	Unidade de Análise (PERH, 2010)	Classificação de vulnerabilidade (ANA, 2014)	Eventos de Inundação (2000-2009)	Eventos de Inundação (2010-2019)	Eventos de Inundação (2020-2022)
Bezerros	UA 3	Média	2000	2010, 2018	-
Caruaru	UA 2	Média	2004, 2009	2011, 2017	2020
Escada	UA 4	Alta	2005	2010, 2011, 2017	-
Sanharó	UA 1	Baixa	-	2019	2020, 2021

Fonte: Autora (2024).

Figura 8 – Mapa de localização dos municípios do estudo.



Fonte: Autora (2024).

Bezerros é um município localizado na região agreste de Pernambuco, com uma população de 61.694 mil habitantes (IBGE, 2022). A economia local é baseada na agricultura, com destaque para a produção de leite, além do comércio e serviços. No que diz respeito à vulnerabilidade socioambiental, o município de Bezerros não possui áreas de risco em relação a deslizamentos de terra e inundações mapeadas, nem política de saneamento estabelecida

(plano, conselho ou fundo municipal). Porém, existe sistema de alerta de risco hidrológico e tem feito investimentos em sistemas de drenagem⁷.

Caruaru é um dos municípios mais importantes da região Agreste de Pernambuco, situado a cerca de 130 km da capital Recife. Com uma população de aproximadamente 380 mil habitantes (IBGE, 2022), o município é considerado um polo econômico e cultural da região, sendo reconhecido por sua tradição cultural como a Capital do Forró durante os festejos de São João, evento que atrai turistas de todo o País, mesmo em período chuvoso.

O município possui uma área de 921,2 km² e é marcado pela presença de serras, vales e rios, o que o torna suscetível a eventos climáticos extremos, como chuvas intensas e inundações (CPRM, 2005), apresentando desafios na gestão dos recursos hídricos e prevenção de inundações. Questões como urbanização desordenada, uso inadequado do solo e falta de saneamento, agravam a vulnerabilidade socioambiental. Por outro lado, a cidade de Caruaru tem importantes medidas para prevenção de desastres como política de saneamento e resíduos, mapeamento integral de áreas de risco e sistema de alerta de riscos hidrológicos⁶.

Escada é um município localizado na região da Mata Sul de Pernambuco, na bacia hidrográfica do rio Ipojuca. Com uma área de cerca de 470 km², possui uma população de aproximadamente 60 mil habitantes (IBGE, 2022). O município é caracterizado por uma paisagem que apresenta áreas de Mata Atlântica, vegetação de Caatinga e plantações de cana-de-açúcar, além de possuir um relevo que varia entre planalto e planície aluvial⁸. No que diz respeito à vulnerabilidade socioambiental, Escada é um município que apresenta desafios, especialmente em relação à sua localização na região da Mata Sul de Pernambuco, que está sujeita a eventos climáticos extremos, como chuvas intensas e enchentes (Fragoso; Silva, 2019).

Em 2010, o município foi atingido por uma das maiores enchentes da sua história, que deixou mais de 4 mil pessoas desalojadas e danos significativos em infraestrutura e áreas urbanas e rurais (Diário de Pernambuco, 2010). Além disso, a atividade econômica predominante em Escada é a agroindústria da cana-de-açúcar, o que pode gerar impactos socioambientais como a poluição do solo, da água e do ar, além de gerar conflitos em torno da posse da terra e dos direitos dos trabalhadores rurais (Campos, 2016). Além disso, o município não tem mapeamento de risco, sistema de alerta de risco⁶.

Sanharó é um município localizado na região Agreste do estado de Pernambuco, com uma população de 18.624 mil habitantes (IBGE, 2022). Sua economia baseia-se principalmente

⁷ Informações retiradas do site Instituto de Água e Saneamento. Disponível em: <https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/>. Acesso em: 09/04/2024.

⁸ Retirado do site da Prefeitura Municipal de Escada: <https://escada.pe.gov.br/>.

na agricultura, é uma das maiores bacias leiteiras do estado, conhecida como “A Cidade do Queijo e do Leite”⁹. O município se destaca na agropecuária mesmo enfrentando dificuldades hídricas. Além da produção de laticínios, Sanharó também é produtor de rebanho bovino, galináceos e culturas como feijão, tomate, milho e mandioca (SILVA, 2014).

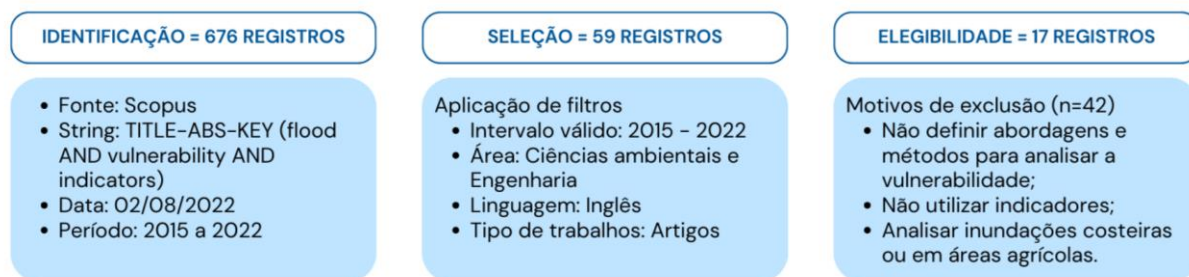
Diante desse contexto socioambiental, a análise da vulnerabilidade às inundações nos municípios apresentados pode fornecer subsídios importantes para a elaboração de políticas públicas e ações de planejamento urbano que considerem a sustentabilidade ambiental e o bem-estar da população local.

5.2 Identificação das variáveis para análise da vulnerabilidade a inundação

As variáveis para compor os indicadores foram selecionadas por meio de uma revisão sistemática de literatura com objetivo de identificar os fatores relevantes e frequentemente utilizados em análise de vulnerabilidade. Uma pesquisa bibliométrica foi realizada na base de dados *Scopus* em agosto de 2022, utilizando as palavras-chave “Flood”, “vulnerability” e “indicators” para identificação dos trabalhos.

A busca resultou em 676 artigos no período de 2015 a 2022 (Identificação). Na seleção, foi feita a aplicação de filtros para artigos da área de ciências ambientais e engenharia em língua inglesa (Seleção). E por fim, foi aplicado os critérios de exclusão (Elegibilidade), resultando em 17 trabalhos elegíveis (Figura 9).

Figura 9 – Critérios da Revisão Sistemática.



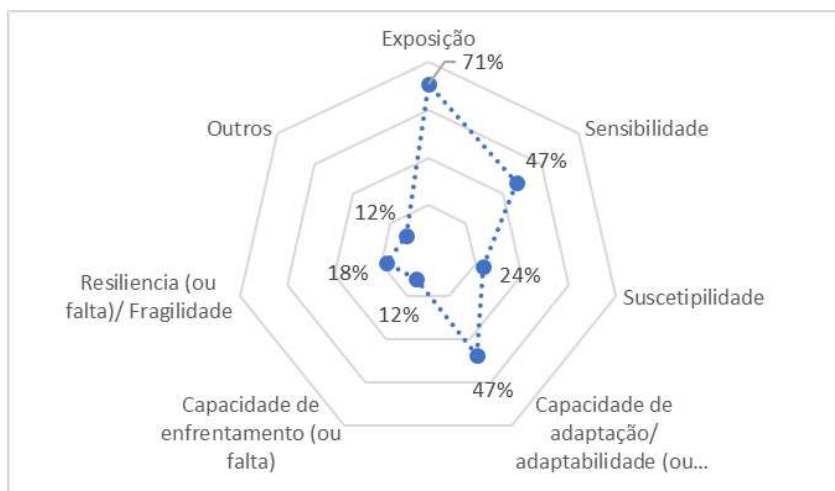
Fonte: Autora (2024).

Os estudos selecionados adotaram diferentes abordagens da vulnerabilidade, contudo, 89% deles consideram o aspecto multidimensional deste fenômeno e adotam duas ou três dimensões para sua análise, sendo as dimensões de Exposição, Sensibilidade e Capacidade de Adaptação as mais utilizadas (Gráfico 3). Destes, 47% adotaram o modelo proposto pelo IPCC

⁹ Retirado do site da Prefeitura Municipal de Sanharó: <https://sanharo.pe.gov.br/>.

e outros 30% consideraram as mesmas três dimensões da vulnerabilidade com diferentes nomenclaturas. Apenas dois estudos analisaram as condições da localidade associando Vulnerabilidade e Risco, ou Vulnerabilidade e Exposição, e outros dois não consideraram a vulnerabilidade com diferentes dimensões.

Gráfico 3 – Dimensões da vulnerabilidade analisadas nos estudos seleccionados.



Fonte: Autora (2024).

Com base nesses estudos, foi possível comparar os indicadores utilizados, variáveis, processos de cálculo e tratamento, assim como a classificação desses indicadores, de acordo com as dimensões da vulnerabilidade e sua relação com o social, ambiental ou tecnológico. Ao todo, esses estudos somam 65 indicadores, dos quais 36 foram classificados como sendo: sociais (39%), ambientais (33%) e tecnológicos (28%). Porém, apenas seis estudos utilizaram indicadores tecnológicos para análise.

Os fatores socioambientais são amplamente utilizados e podem variar conforme o fenômeno estudado ou a área de estudo. Eles estavam presentes em 65% dos estudos identificados na revisão, pois têm grande impacto na capacidade de adaptação e no risco enfrentado por uma comunidade. Porém, a utilização de fatores tecnológicos ainda é pouco expressiva e, quando utilizados, não apresentam uma classificação que possibilite distingui-los e considerar o seu impacto para vulnerabilidade.

Esta pesquisa selecionou variáveis sociais, ambientais e tecnológicas, para compor os indicadores considerando as dimensões da vulnerabilidade, exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação, totalizando 15 variáveis. As variáveis adotadas foram as mais frequentemente utilizadas na literatura avaliada, considerando características locais, disponibilidade da informação e relevância descrita para elas. Esta composição se assemelha à estrutura adotada por Chang *et al.* (2021a), que avaliou a vulnerabilidade a inundações,

utilizando um *framework* de Sistema Sócio-Ecológico-Tecnológico para diferentes cidades nos Estados Unidos. Porém, neste trabalho, os indicadores foram calculados separadamente para possibilitar avaliar como suas combinações influenciam na variação da vulnerabilidade a inundação em diferentes locais.

5.3 Proposta de indicadores para análise da vulnerabilidade a inundação

Esta pesquisa propõe um conjunto de indicadores sociais, ambientais e tecnológicos com base nas dimensões da vulnerabilidade: exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação, totalizando 3 indicadores (Figura 10).

Figura 10 – Síntese dos indicadores.



Fonte: Autora (2024).

5.3.1 Indicador Social

As variáveis escolhidas para compor o indicador social (Quadro 4) desta pesquisa foram obtidas a partir de dados do Censo 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na escala de setor censitário, e são elas:

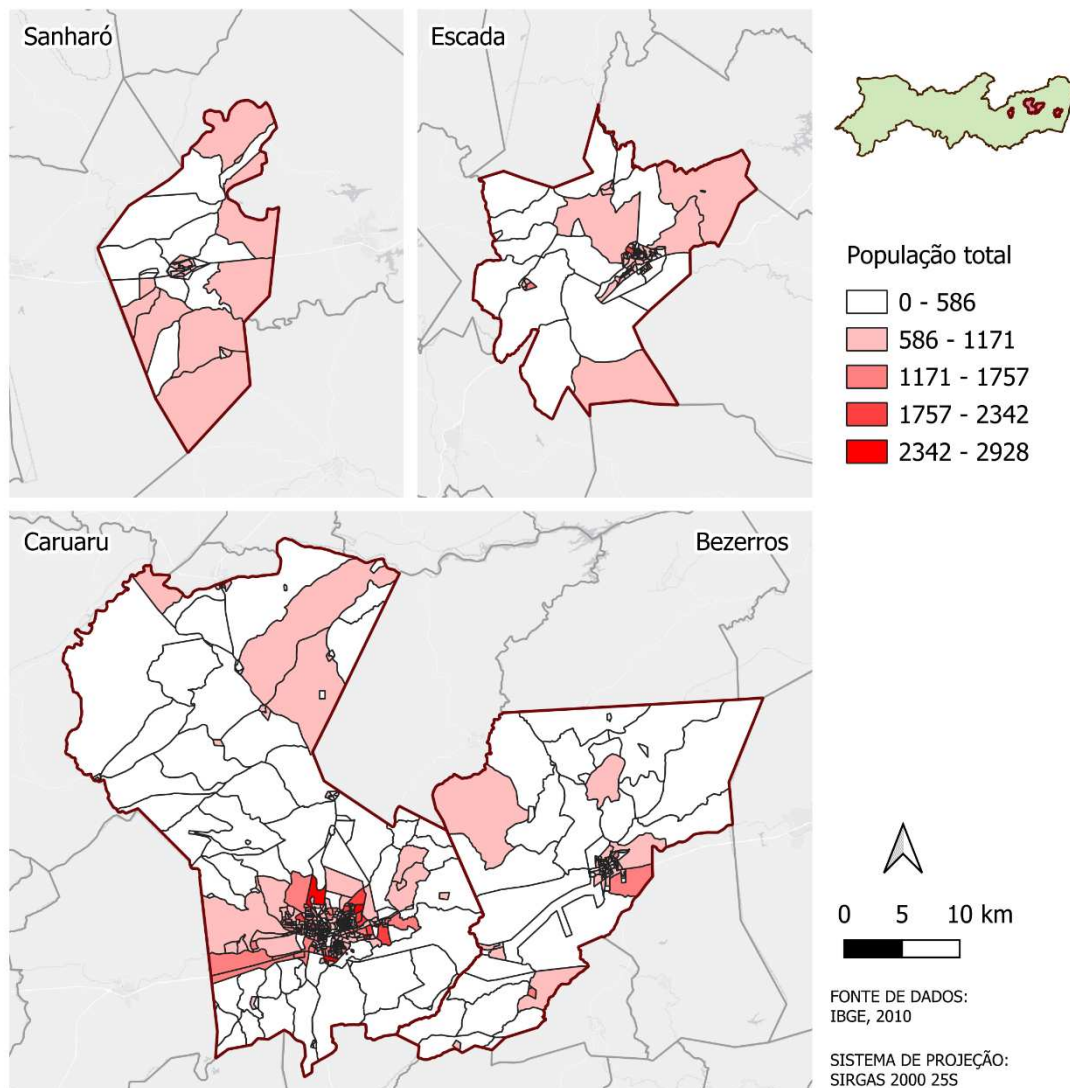
Quadro 4 – Variáveis do Indicador Social.

Dimensão	Variável	Descrição	Origem
Exposição	População	Densidade demográfica	IBGE
	Dependentes	menor de 14 e maior de 60 anos	IBGE
Sensibilidade	Pobreza	Menos 1/4 Salário per capita	IBGE
	Educação	Pessoas alfabetizadas por domicílio	IBGE
Capacidade de adaptação	Renda	Pessoas sem renda por domicílio	IBGE

Fonte: Autora (2024).

População: Descrita pela densidade populacional, é uma variável importante do nível de exposição que uma comunidade enfrenta, está diretamente relacionado com o número de pessoas que está em risco ou pode ser afetado por um desastre (Chang *et al.*, 2021a). Quanto maior o número de pessoas numa área, maior a vulnerabilidade, por isso a variável de população por domicílio no setor censitário (Figura 11) foi utilizada para obter a densidade populacional de cada setor, sendo utilizada para mensurar esta situação.

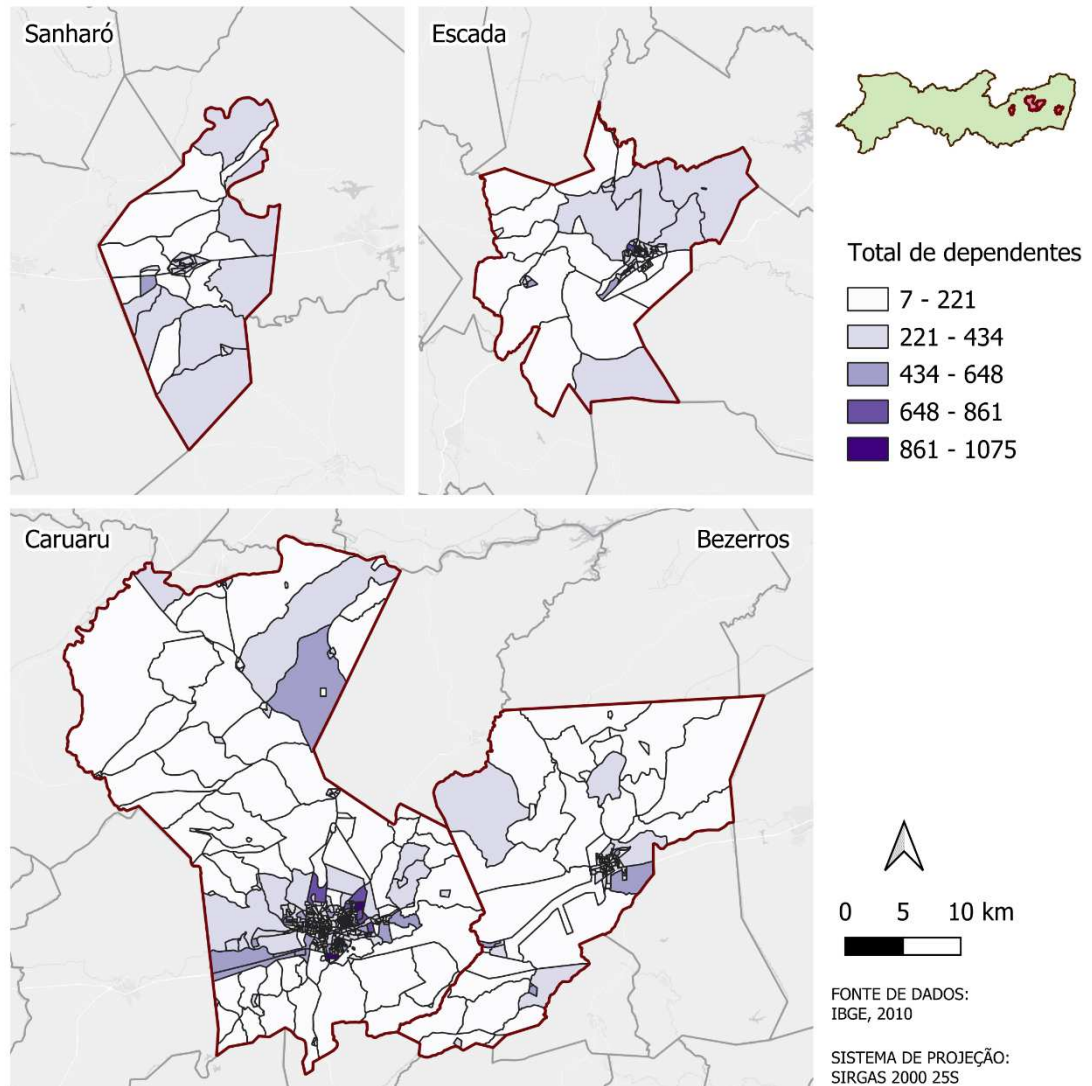
Figura 11 – População por setor censitário (IBGE).



Fonte: Autora (2024).

Dependentes: Este trabalho considerou como dependentes crianças e idosos (pessoas com menos de 14 ou mais de 60 anos, respectivamente) (Figura 12). Esses grupos são mais vulneráveis a uma situação de desastres, pois dependem da orientação e auxílio de outras pessoas, além de geralmente serem dependentes financeiramente (Hamidi *et al.*, 2020). Dessa forma, quanto maior a população dependente, mais sensível está aquela comunidade.

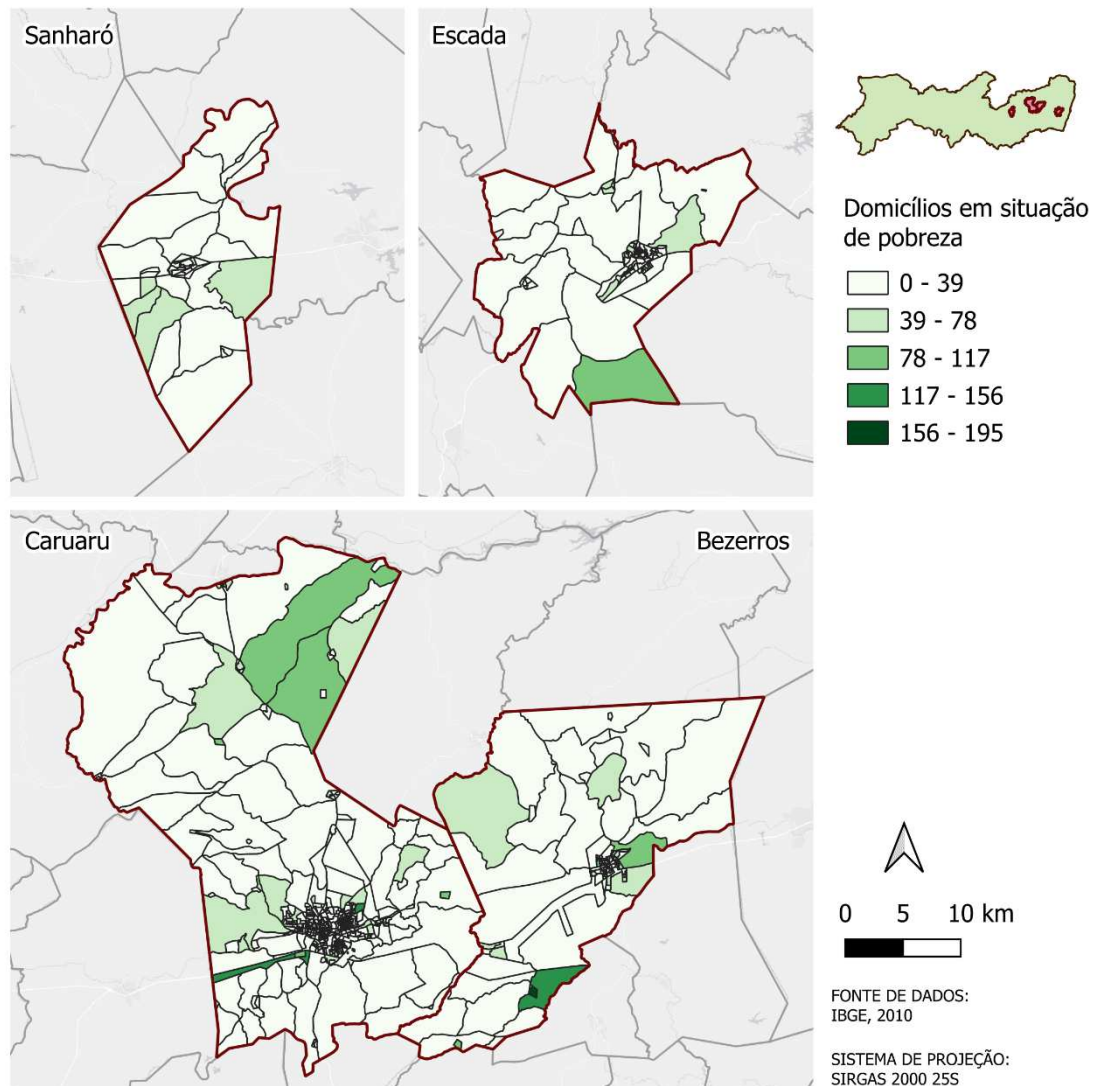
Figura 12 – Dependentes por setor censitário (IBGE).



Fonte Autora (2024).

Pobreza: Outro indicador da sensibilidade da população é a quantidade de famílias em situação de pobreza, isto é, com menos de $\frac{1}{4}$ salário-mínimo de renda per capita (Figura 13). Pessoas em situação de pobreza, em geral, têm moradias em situações mais precárias, menos acesso à informação e menos recursos para lidar com desastres que possam ocorrer (Chang *et al.*, 2021a).

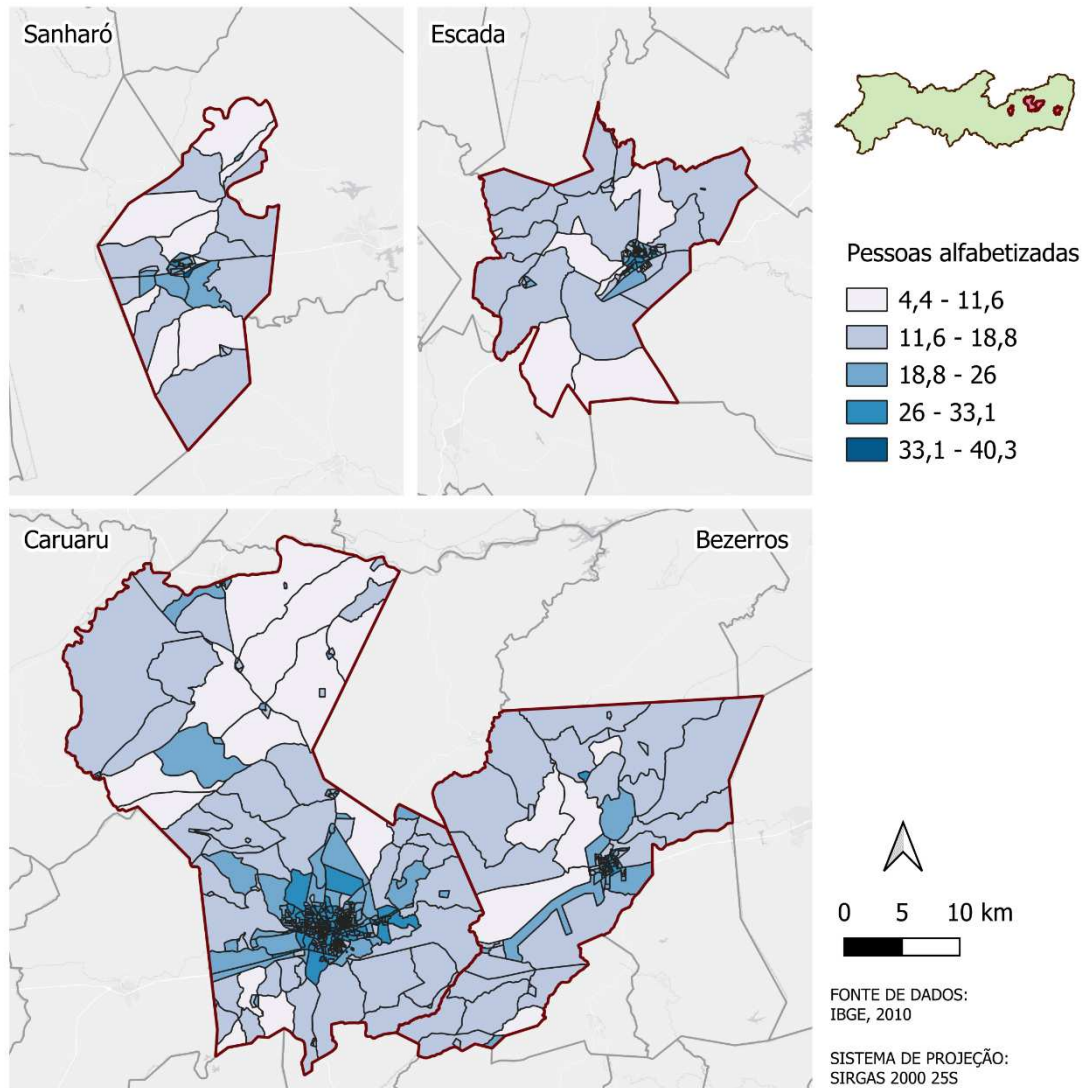
Figura 13 – Pobreza por setor censitário (IBGE).



Fonte: Autora (2024).

Educação: Este indicador considera a quantidade de pessoas alfabetizadas por domicílio (Figura 14), pois esta é uma condição que facilita o acesso e a compreensão de informação (Hamidi *et al.*, 2020), o que pode ajudar a população a lidar com um evento adverso.

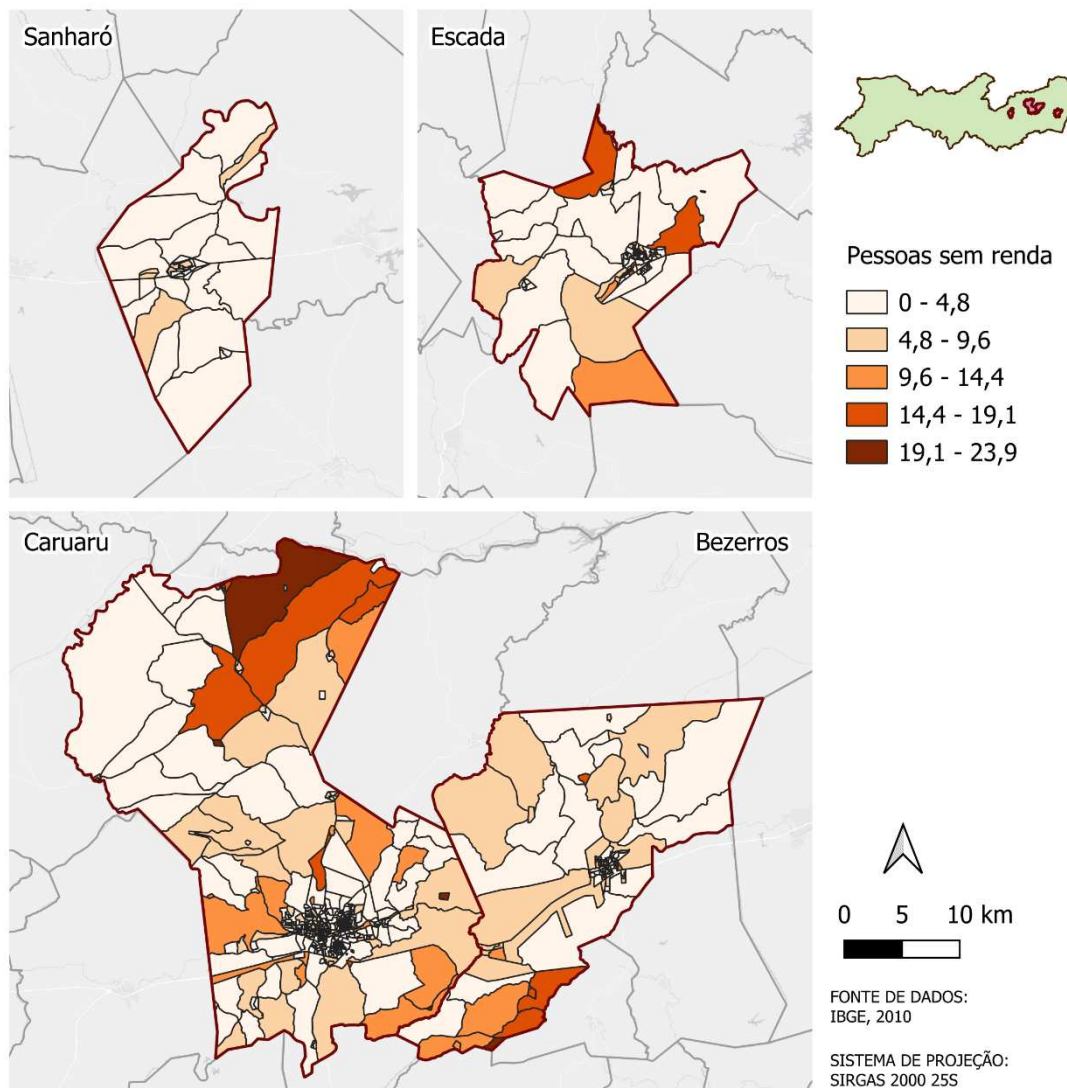
Figura 14 – Educação por setor censitário (IBGE).



Fonte: Autora (2024).

Renda: Indicado pelo número de pessoas sem renda por domicílio (Figura 15) e relacionado a capacidade de adaptação da população durante e após um evento catastrófico. Quanto maior a quantidade de pessoas sem renda, maior a vulnerabilidade (Hamidi *et al.*, 2020).

Figura 15 – Renda por setor censitário (IBGE).



Fonte: Autora (2024).

5.3.2 Indicador Ambiental

As variáveis ambientais (Quadro 5) foram obtidas de diversos bancos de dados, como os do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), da Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável (FBDS) e do Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

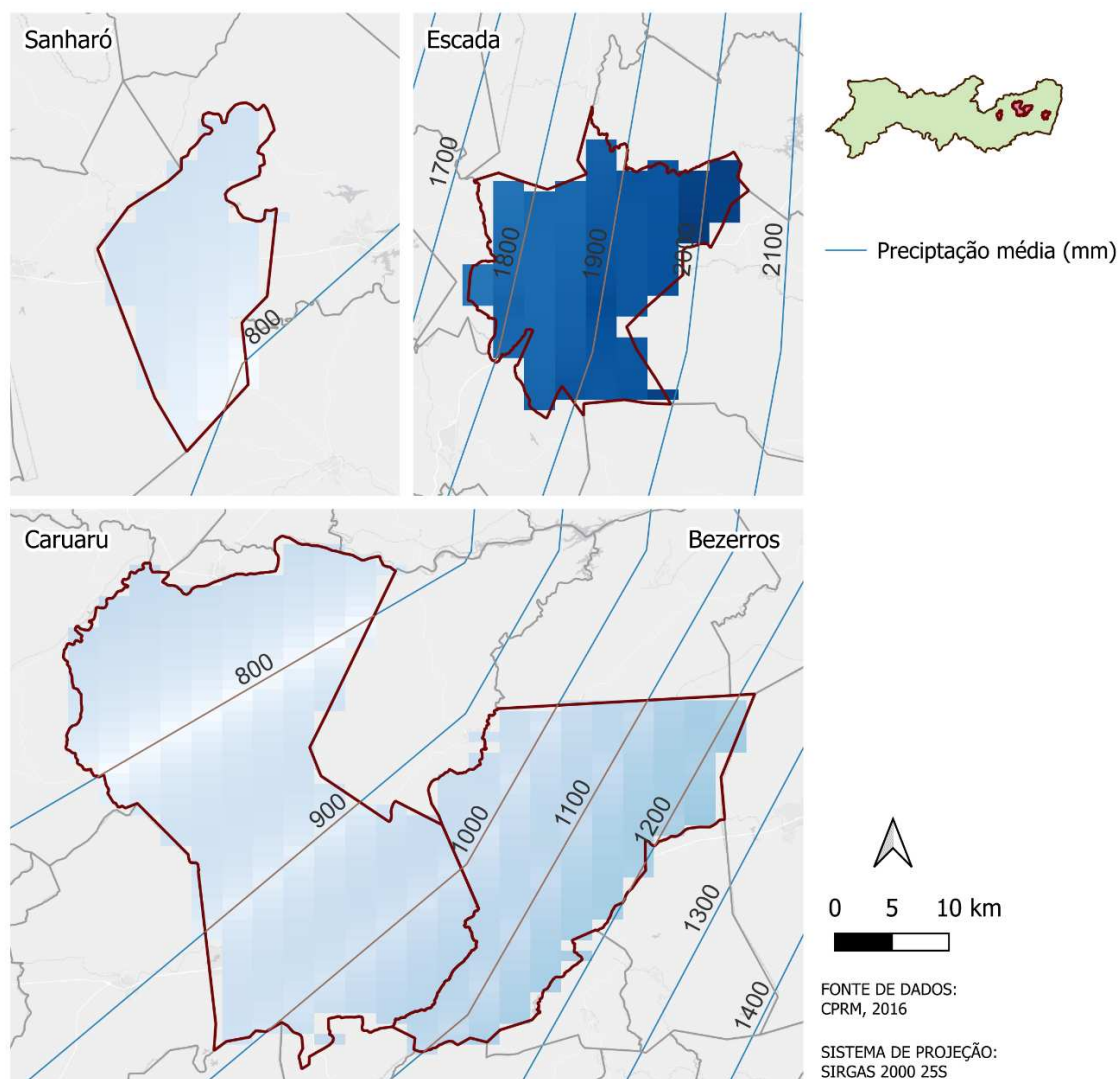
Quadro 5 – Variáveis do Indicador Ambiental.

Dimensão	Variável	Descrição	Origem
Exposição	Precipitação	Isoietas	CPRM
	Rec. Hídricos	Distância escalonada do rio	FBDS
Sensibilidade	Declividade	Classes de declividade Embrapa	INPE (Topodata)
	Elevação	Classes de elevação	INPE (Topodata)
Capacidade de adaptação	Tipos de Solos	Classes de solos	FBDS
	Uso do Solo	Usos do solo	FBDS

Fonte: Autora (2024).

Precipitação: Refere-se à quantidade de chuva que cai em uma determinada área durante um período específico, sua intensidade pode contribuir significativamente para inundações, sendo uma indicação da exposição do local (Azizi *et al.*, 2022). Os dados utilizados foram o de precipitação média anual (de 1977 a 2006) do CPRM (Figura 16).

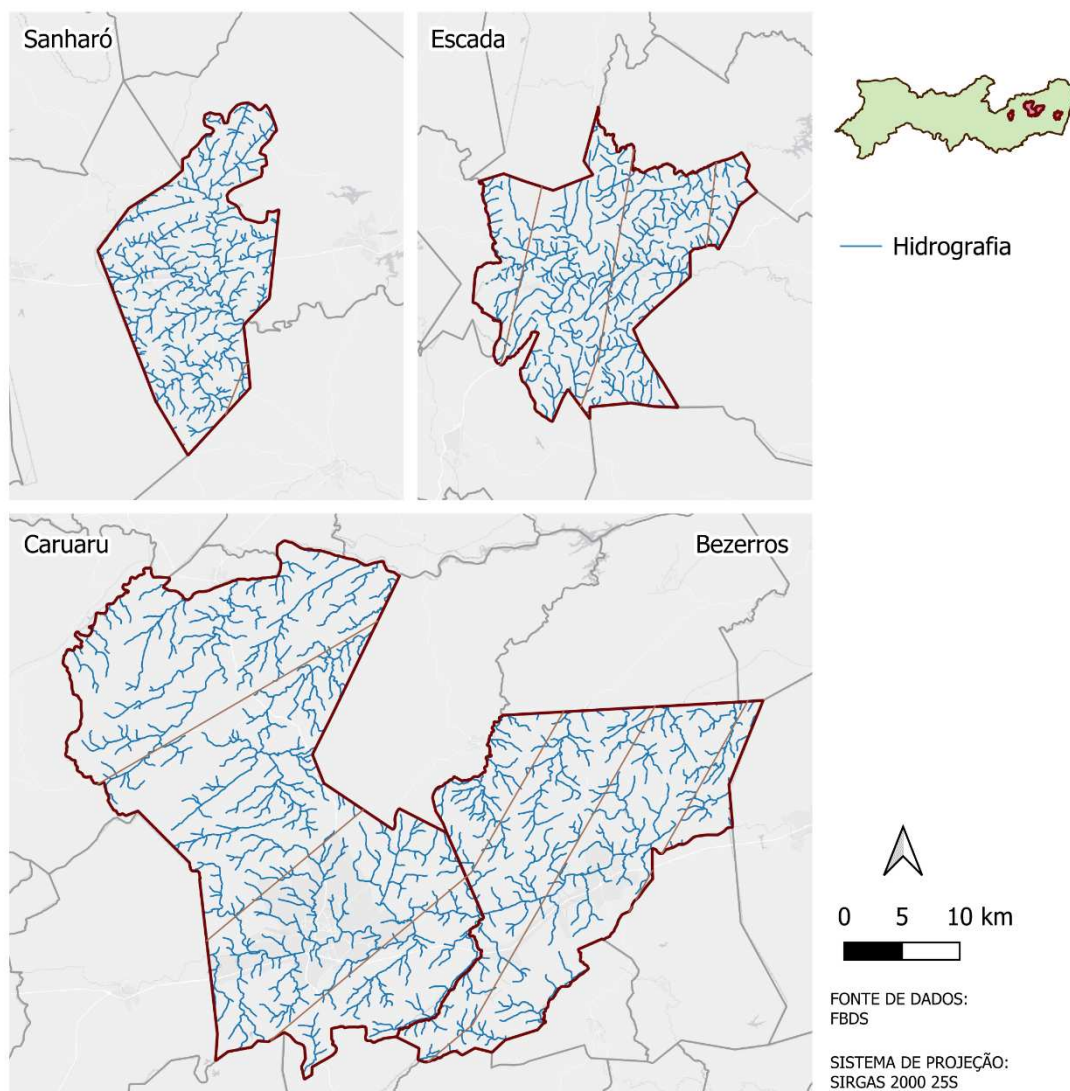
Figura 16 – Precipitação média anual (1977 a 2006).



Fonte: Autora (2024).

Proximidade de rios: A proximidade com cursos d'água pode aumentar o risco de inundações, especialmente em áreas planas e propensas a transbordamentos durante eventos de chuvas intensas, aumentando a exposição (Begg; N'Yeurt; Lese, 2021). Para isso, foi utilizado o mapa de hidrografia da área de estudo (Figura 17), disponibilizado pela FBDS.

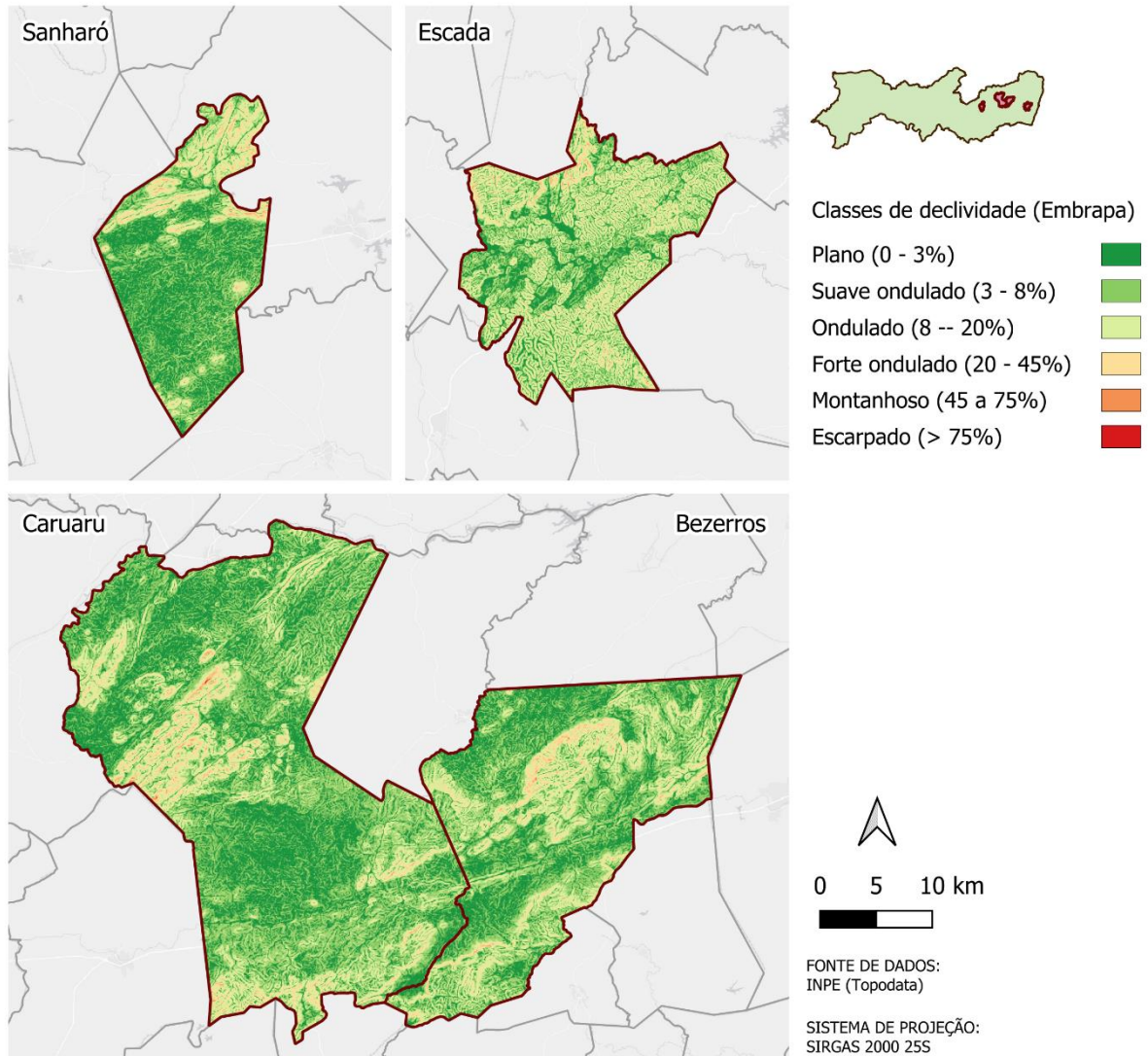
Figura 17 – Proximidade com rios.



Fonte: Autora (2024).

Declividade: Refere-se à inclinação do terreno em uma determinada área (Figura 18). Áreas com maior declive tendem a apresentar maior velocidade de escoamento da água, o que pode influenciar na contribuição da chuva para o fluxo dos rios, colaborando para o transbordamento em áreas mais baixas. Por outro lado, quanto mais plano o terreno, mais suscetível a alagamentos, pois a água tende a acumular nessas áreas (Ouma; Tateishi, 2014).

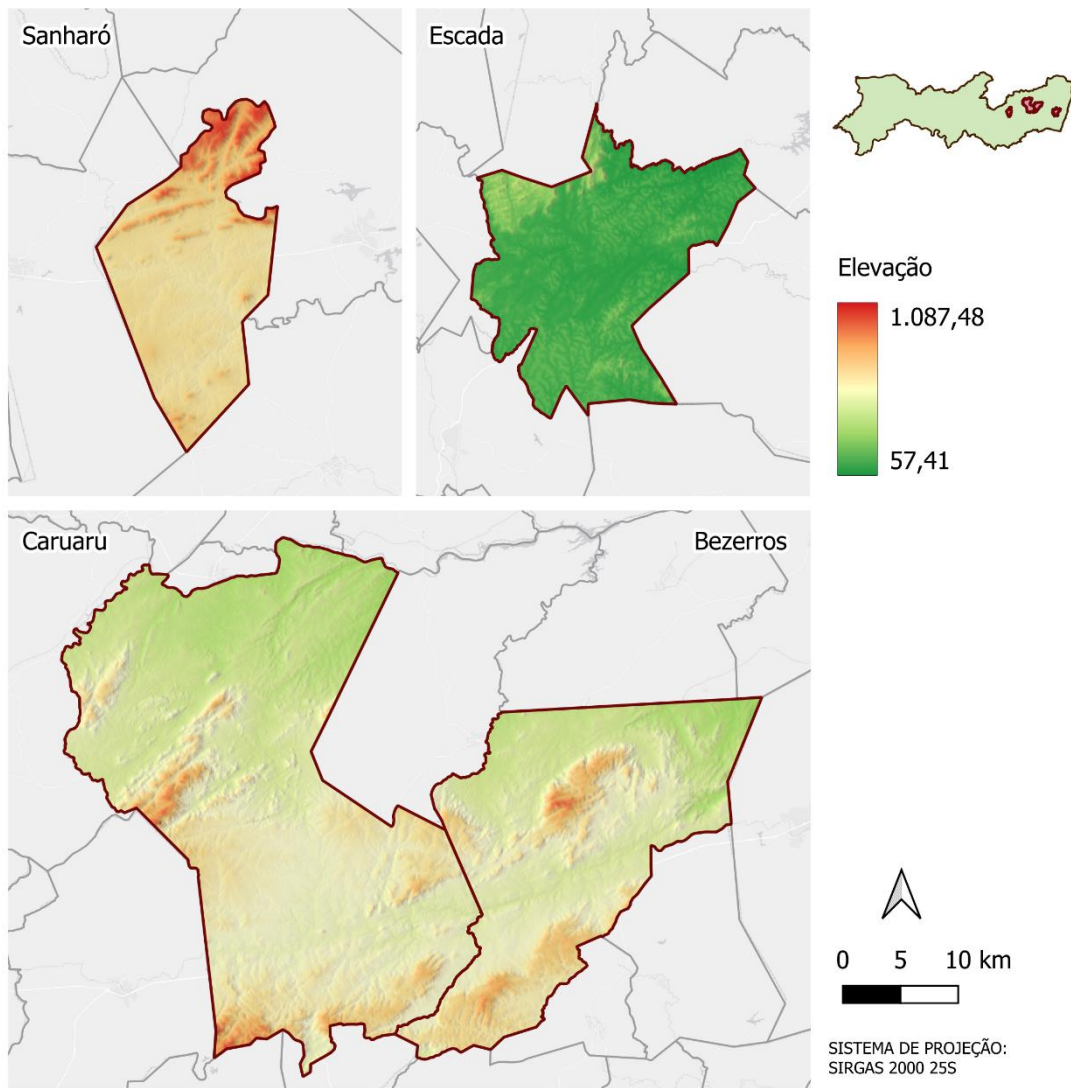
Figura 18 – Declividade (classes da Embrapa).



Fonte: Autora (2024).

Elevação: Indica a altitude ou altura de uma determinada área em relação ao nível do mar (Figura 19). Locais em terrenos mais baixos ou próximos a corpos hídricos podem ser mais suscetíveis a inundações, mesmo que tenham um pouco mais de declividade, enquanto áreas em elevações mais altas podem ter menor risco de alagamentos, ainda que sejam mais planas (Ouma; Tateishi, 2014). Este é um parâmetro que juntamente com a declividade, formam um indicativo da sensibilidade ambiental de uma área.

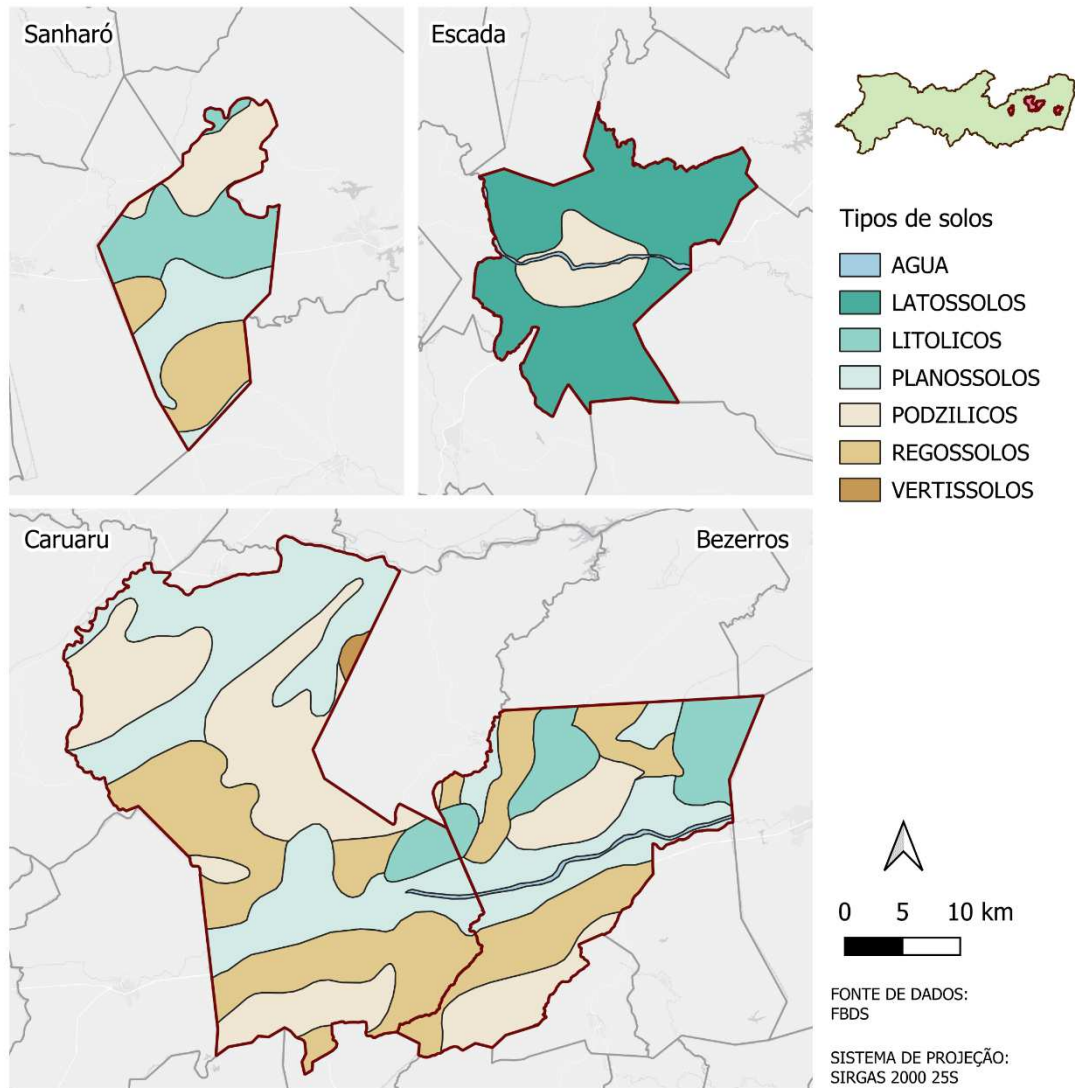
Figura 19 - Elevação.



Fonte: Autora (2024).

Tipos de solos: Considera a composição do solo na região de estudo (Figura 20). Solos com baixa permeabilidade, como argilosos, podem reter mais água, contribuindo para inundações, enquanto solos arenosos ou mais permeáveis podem permitir maior absorção de água (Pathan *et al.*, 2022).

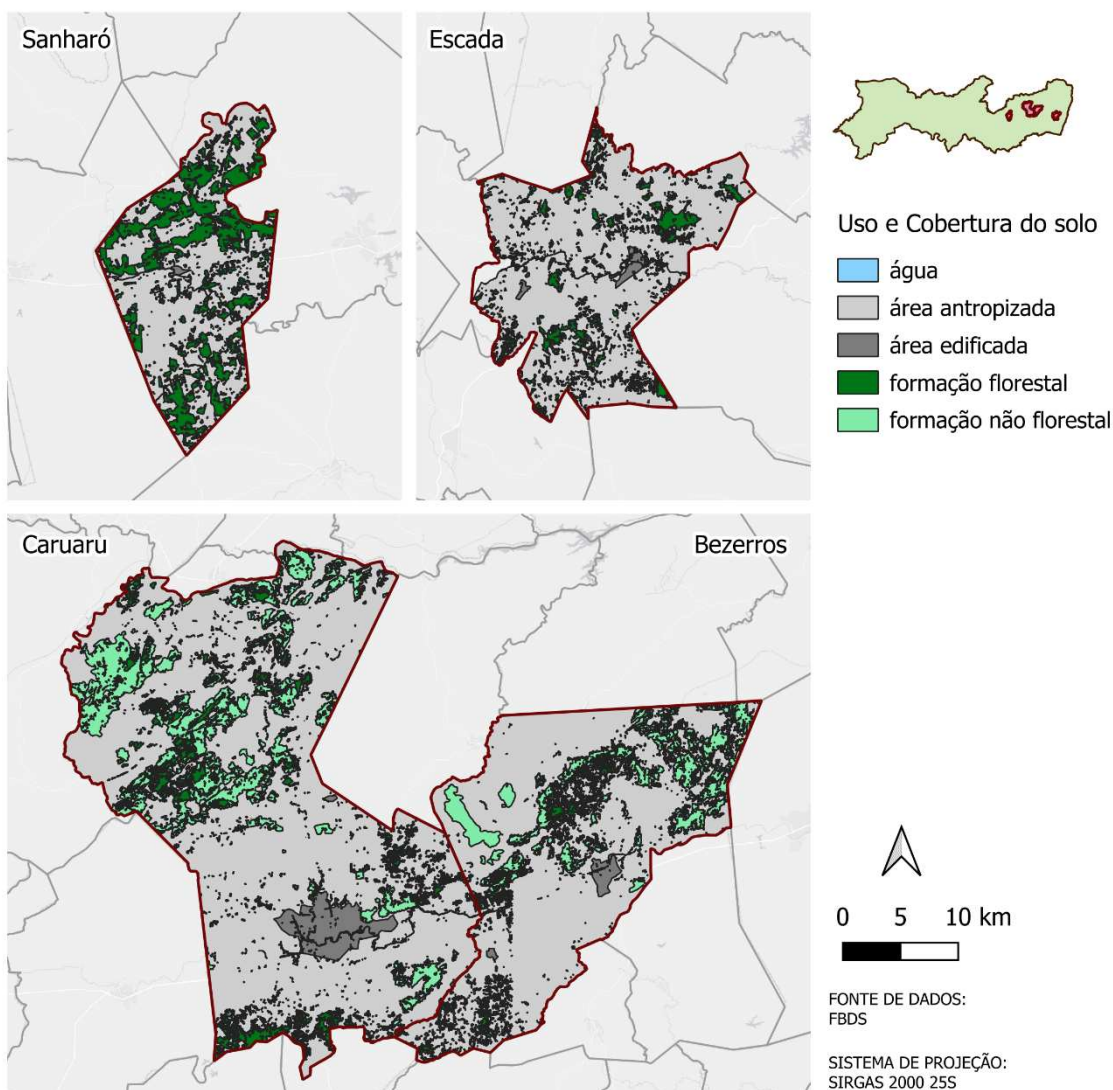
Figura 20 – Tipos de solos.



Fonte: Autora (2024).

Uso e Cobertura do solo: Avalia como a terra é utilizada na área de estudo (Figura 21), incluindo áreas urbanas, rurais, industriais, florestais, entre outras. O uso inadequado do solo, como a urbanização descontrolada em áreas de alto risco, pode aumentar a vulnerabilidade a inundações (Hoang V. D; Tran H. T; Nguyen T. T; 2020).

Figura 21 – Uso do solo.



Fonte: Autora (2024).

5.3.3 Indicador Tecnológico

Nesta pesquisa, os indicadores tecnológicos foram obtidos com base nos dados da Agência Nacional de Águas (ANA), Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas (INEP), Ministério dos Transportes e da saúde, são eles (Quadro 6):

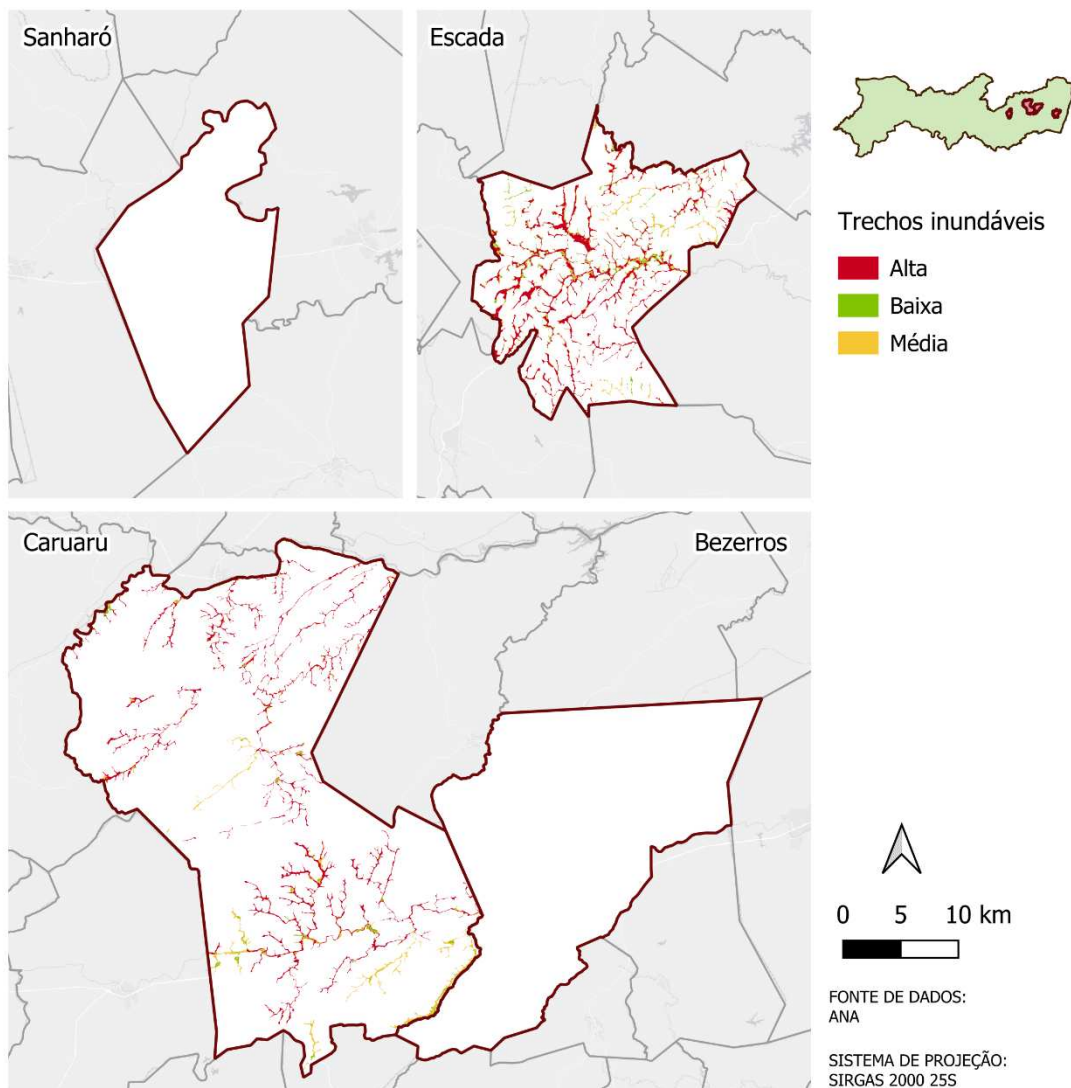
Quadro 6 – Variáveis Tecnológicas.

Dimensão	Variável	Descrição	Origem
Exposição	Experiência prévia	Trechos inundáveis (ANA)	ANA
Sensibilidade	Infraestrutura	Proximidade escalonada com estradas	Min. dos Transportes
Capacidade de Adaptação	Capacidade de abrigo	Proximidade escalonada com escolas	INEP
	Serviços de emergência	Proximidade escalonada com Hospitais	Min. da Saúde

Fonte: Autora (2024).

Trechos Inundáveis: São áreas de vulnerabilidade a inundações classificadas pela ANA de acordo com a recorrência desses eventos e os impactos associados a eles (Figura 22). A localização em zonas historicamente inundáveis aumenta a exposição da área a danos durante inundações (Andrade; Szlafsztain, 2018).

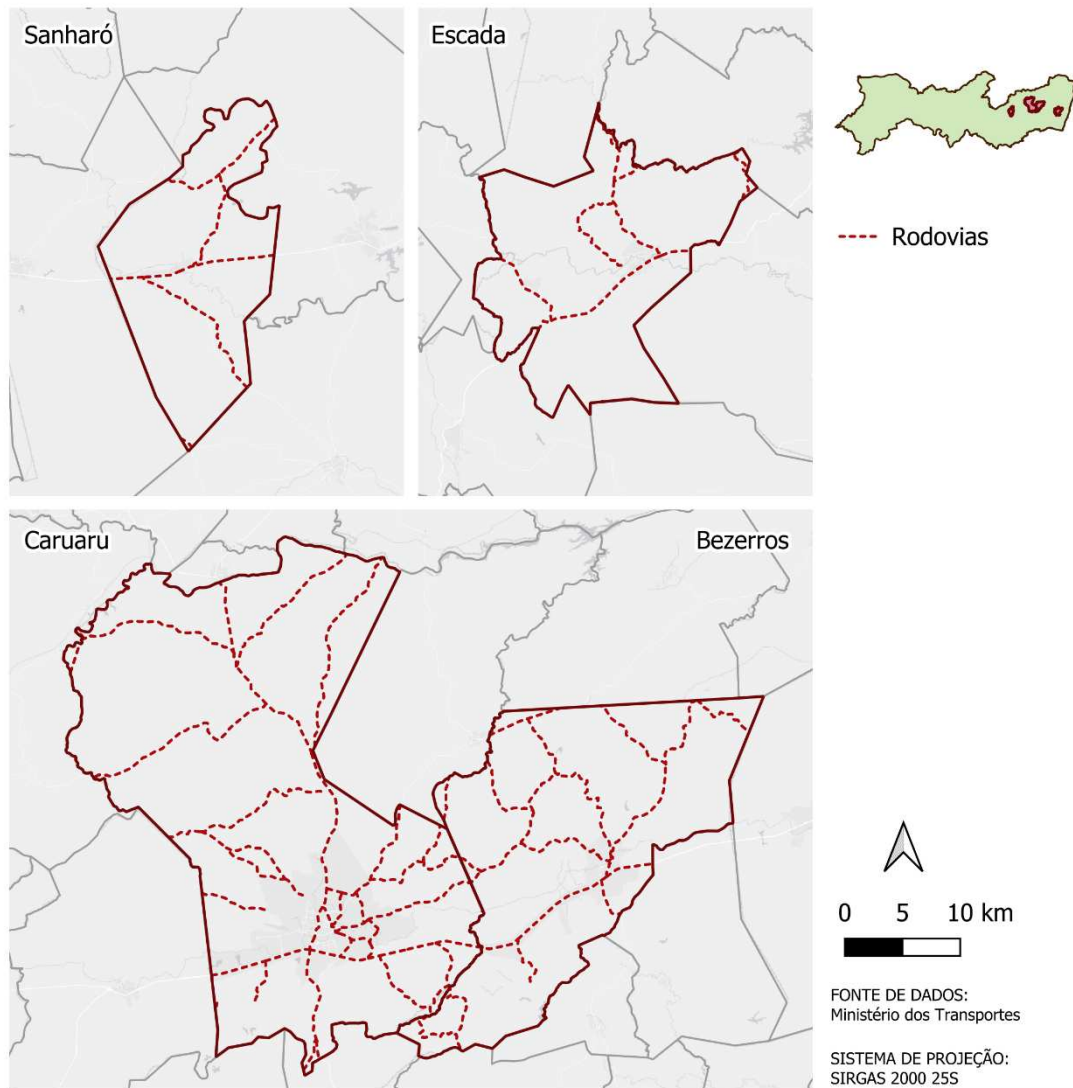
Figura 22 – Trechos inundáveis (ANA).



Fonte: Autora (2024).

Infraestrutura (Estradas) - A proximidade com vias de acesso influencia na sensibilidade, a ausência de estradas pode dificultar o socorro, acesso a abrigo e a evacuação durante inundações (Chang *et al.*, 2021a). Neste estudo foi considerada a proximidade com rodovias federais e estaduais que cortam os municípios (Figura 23).

Figura 23 – Infraestrutura (Estradas).



Fonte: Autora (2024).

Serviços de emergência - A proximidade com serviços de emergência contribui para a adaptabilidade, garantindo assistência médica imediata durante e após inundações (Chang *et al.*, 2021a). As unidades consideradas nesta pesquisa foram os Hospitais, Unidades de pronto atendimento (UPAS), Policlínicas e Unidades mistas de saúde de administração estadual (Figura 24).

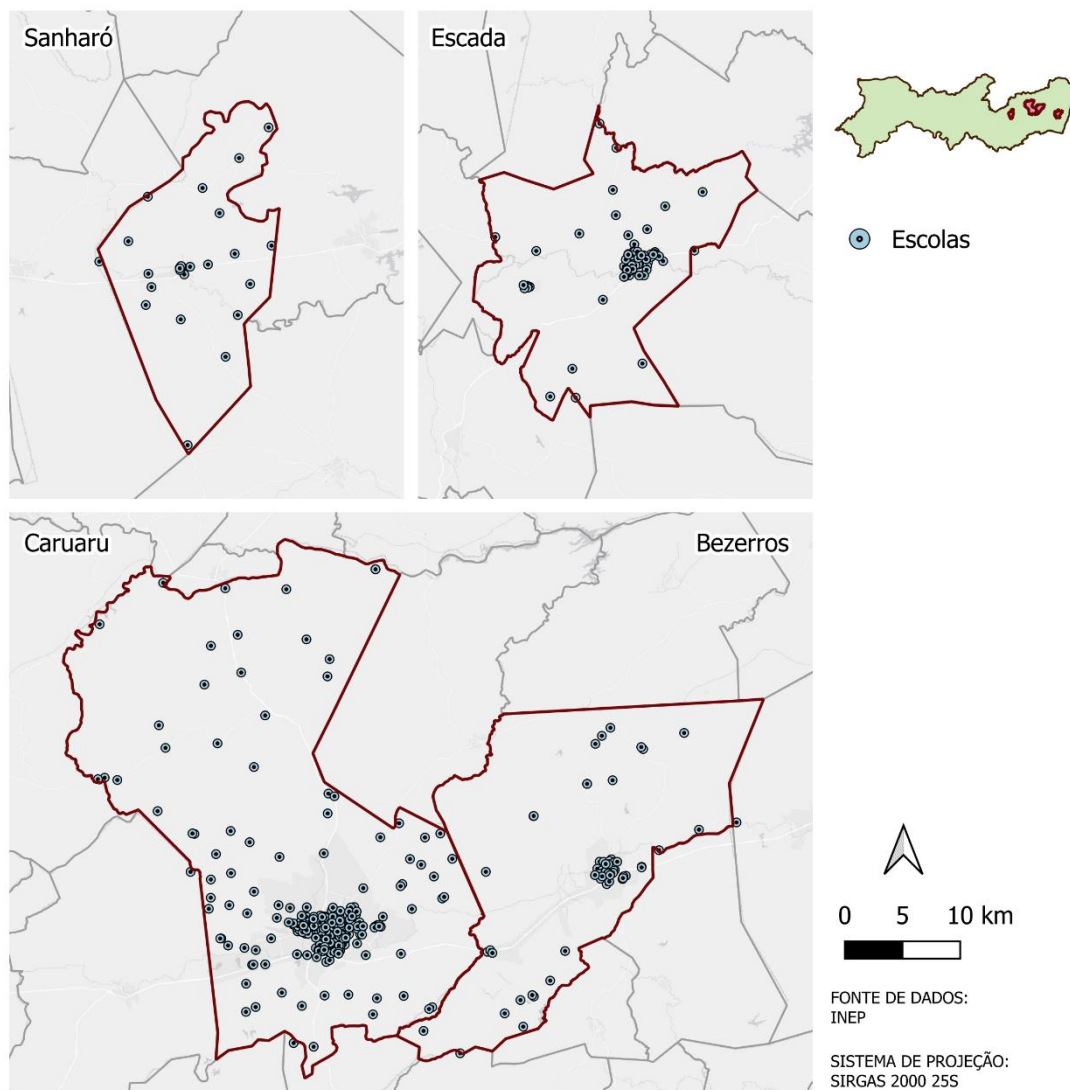
Figura 24 – Unidades de saúde.



Fonte: Autora (2024).

Capacidade de abrigo - A capacidade de abrigo, oferecida por algumas instituições, melhora a adaptabilidade, fornecendo locais seguros e recursos essenciais para as vítimas de inundações (Andrade; Szlafsztein, 2018). Em geral, escolas são utilizadas para oferecer abrigos temporários para população, de forma que foi feito um levantamento de escolas públicas e particulares existentes na área de estudo através de dados do INEP (Figura 25).

Figura 25 – Escolas.



Fonte: Autora (2024).

5.4 Cálculo dos indicadores

Após selecionadas, as variáveis foram normalizadas, de forma que todas estejam numa escala padronizada que possibilite uma análise mais íntegra. A normalização objetivou gerar valores entre zero e um, e foi realizada através do escalonamento linear mínimo-máximo (Chang *et al.*, 2021a; Hamidi *et al.*, 2020).

Essa operação foi realizada para as variáveis sociais, considerando sua influência sobre a vulnerabilidade, isto é, se aumenta ou diminui. A operação consistiu em subtrair o mínimo valor da variável de seu valor real, quando esta aumenta a vulnerabilidade (Equação 1), e subtrair o valor máximo do valor real da variável (Equação 2), quando esta diminui a vulnerabilidade.

$$V_i = \frac{X_i - X_{imín}}{X_{imax} - X_{imín}} \quad [1]$$

$$V_i = \frac{X_{imax} - X_i}{X_{imax} - X_{imín}} \quad [2]$$

Sendo i , o indicador, V_i o valor normalizado e X_i , X_{imax} e $X_{imín}$ os valores máximo e mínimo do indicador, respectivamente. Os valores resultantes, que variam entre 0 e 1, foram divididos em 5 classes de intervalos iguais que receberam valores de 1 a 5 para representar o grau de exposição, sensibilidade ou capacidade de adaptação. (Quadro 7). Vale ressaltar que para as variáveis de capacidade de adaptação, o grau 5 representa “muito alta” capacidade de adaptação, sendo a melhor situação, enquanto o valor 1, é a classe de “muito baixa” capacidade de adaptação, portanto, a pior situação.

Quadro 7 – Normalização e Classificação das variáveis sociais.

Valor normalizado	Peso	Grau
0	1	Muito Baixo
0.25	2	Baixo
0.50	3	Moderado
0.75	4	Alto
1	5	Muito Alto

Fonte: Autora (2024).

As variáveis ambientais e tecnológicas quantitativas, seguiram um processo semelhante de classificação em intervalos e atribuição de notas de 1 a 5, já aquelas qualitativas tiveram as notas atribuídas com base na literatura (Quadro 8 e Quadro 9).

Quadro 8 – Normalização e Classificação das variáveis ambientais.

Variável	Classes	Peso	Grau
Precipitação	800 a 1100 mm	1	Muito Baixo
	1100 a 1400 mm	2	Baixo
	1400 a 1700 mm	3	Moderado
	1700 a 2000 mm	4	Alto
	> 2000 mm	5	Muito Alto
Distância de Recursos Hídricos	> 400 m	1	Muito Baixo
	400 m	2	Baixo
	300 m	3	Moderado
	200 m	4	Alto
	100 m	5	Muito Alto
Declividade	> 20%	1	Muito Baixo
	8 - 20%	3	Moderado
	0 - 8%	5	Muito Alto
Elevação	> 829 m	1	Muito Baixo
	572 a 829 m	2	Baixo
	314 a 572 m	3	Moderado
	58 a 314 m	4	Alto
	< 58 m	5	Muito Alto
Uso e Cobertura do Solo	Água	5	Muito Alto
	Florestal	4	Alto
	Não Florestal	3	Moderado
	Área Antropizada	2	Baixo
	Área Edificada	1	Muito Baixo
Tipos de solos	Latossolos	5	Muito Alto
	Planossolos	4	Alto
	Podzólicos	3	Moderado
	Regossolos e Litólicos	2	Baixo
	Vertissolos	1	Muito Baixo

Fonte: Autora (2024).

Para a variável de uso do solo, faz-se um esclarecimento quando sua classificação, a área edificada é uma área urbana consolidada, que possui maiores áreas impermeáveis e maior produção de resíduos devido as atividades humanas, portanto, muito baixa capacidade de adaptação. Já a área antropizada é aquela que passou por alguma interferência humana no solo, mas não necessariamente será uma área edificada.

Quadro 9 – Normalização e Classificação das variáveis tecnológicas.

Variável	Classes	Peso	Grau
Trechos Inundáveis	Baixo risco	1	Muito Baixo
	Médio risco	3	Moderado
	Alto risco	5	Muito Alto
Infraestrutura (estradas)	< 200 m	1	Muito Baixo
	200 a 400 m	2	Baixo
	400 a 600 m	3	Moderado
	600 a 800 m	4	Alto
	> 800	5	Muito Alto
Serviços de emergência	> 2,5 Km	5	Muito Alto
	2,5 a 5 Km	4	Alto
	5 a 7,5 Km	3	Moderado
	7,5 a 10 Km	3	Baixo
	> 10 Km	1	Muito Baixo
Capacidade de abrigo	< 250 m	5	Muito Alto
	250 a 500 m	4	Alto
	500 a 750 m	3	Moderado
	750 a 1000 m	3	Baixo
	> 1000 m	1	Muito Baixo

Fonte: Autora (2024).

As variáveis foram agrupadas de acordo com a dimensão da vulnerabilidade e o aspecto que representam: Exposição social, Exposição Ambiental e Exposição Tecnológica, Sensibilidade Social, Sensibilidade Ambiental e Sensibilidade Tecnológica, Capacidade de Adaptação Social, Capacidade de Adaptação Ambiental e Capacidade de Adaptação Tecnológica. E em seguida foram calculados os indicadores de vulnerabilidade social, ambiental e tecnológico (Quadro 10).

Quadro 10 – Variáveis agrupadas.

Indicador	Variável	Variáveis agrupadas
Social	$\frac{\text{Exposição social} \times \text{Sensibilidade social}}{\text{Capacidade de adaptação social}}$	$\frac{(\text{Pop}) \times (\text{Dep} + \text{Pob})}{(\text{Edu} + \text{Ren})}$
Ambiental	$\frac{\text{Exposição ambiental} \times \text{Sensibilidade ambiental}}{\text{Capacidade de adaptação ambiental}}$	$\frac{(\text{Precip} + \text{Rec. Híd.}) \times (\text{Dec} + \text{Ele})}{(\text{T. Solos} + \text{C. Solo})}$
Tecnológico	$\frac{\text{Exposição tecnológica} \times \text{Sensibilidade tecnológica}}{\text{Capacidade de adaptação tecnológica}}$	$\frac{(\text{T. inun}) \times (\text{Infra})}{(\text{Emerg} + \text{Abrigo})}$

Fonte: Autora (2024).

Durante a obtenção dos dados foram necessários outros processos de tratamento das variáveis, como recortes espaciais, conversões para valores percentuais ou de densidade, e

aplicação de *buffers* (regiões em torno de pontos ou linhas). Estes procedimentos foram realizados com apoio do *software open source* de Sistema de Informações Geográficas (SIG), o QGIS, versão 3.34. Estas operações resultaram na elaboração de mapas para os indicadores e índices de vulnerabilidade a inundações.

5.5 Metodologia de análise espacial

Com os indicadores calculados, foi realizada uma sobreposição de mapas para obtenção dos índices de vulnerabilidade socioambiental (IVSA) e índice de vulnerabilidade integrado (IVSAT). Dessa forma, a vulnerabilidade foi estimada por um indicador composto com ponderação igual para cada componente (Lee, Choi. 2018). A Equação 3 foi utilizada na sobreposição dos dados para calcular: a vulnerabilidade social, ambiental e tecnológica, com suas respectivas variáveis; a vulnerabilidade socioambiental (IVSA), considerando os fatores sociais e ambientais; e a vulnerabilidade integrada (IVSAT), que inclui os fatores tecnológicos no cálculo (IVSAT) (Aktar *et al.*, 2021; Chang *et al.*, 2021a; Hamidi *et al.*, 2020).

$$IV_d = \left(\frac{\sum E \times \sum S}{\sum A} \right)^{1/3} \quad [3]$$

Sendo IV o valor do índice e d , o domínio que representa o social, ambiental ou tecnológico. E , S e A representam os fatores de exposição, sensibilidade e adaptabilidade, respectivamente.

Para análise dos resultados foi criada uma escala com valores obtidos variando de 1 a 3 classificados em 5 intervalos iguais, onde a vulnerabilidade varia de muito baixa a muito alta. Também foi feita a comparação dos valores obtidos nos índices de vulnerabilidade através dos percentuais de área de cada classe, apresentada em mapas e gráficos de barras.

O resultado obtido levanta um questionamento de como esses valores se relacionam com os seus vizinhos, se existe algum padrão na ocorrência desses índices e que importância isso pode ter para a análise de vulnerabilidade. Nesse contexto, a Análise de Dados Espacial Exploratória possui técnicas que possibilitam identificar possíveis padrões de associação espacial e observações atípicas, sendo amplamente utilizadas em análises territoriais relacionadas com economia, demografia e geografia (Lopes; Pereira, 2022).

Uma das técnicas mais utilizadas é o do índice de autocorrelação espacial I de Moran Global, este índice avalia a autocorrelação espacial dos índices de vulnerabilidade através de uma medida estatística que quantifica a dependência espacial entre os valores de uma variável

e identifica se os dados possuem um padrão espacial ou são aleatórios (Leta; Adugna, 2023). O índice fornece uma indicação do grau de associação espacial para o conjunto de dados.

O índice I de Moran é um valor único que varia de -1 a 1 para indicar a existência da autocorrelação espacial positiva (1), negativa (-1) ou sua inexistência, ou seja, não há padrão (Lopes; Pereira, 2022). Uma autocorrelação positiva ($0 < \text{índice} \leq 1$) indica que existe um agrupamento de valores semelhantes, quando o resultado é negativo ($-1 \leq \text{índice} < 0$), o agrupamento é de diferentes valores. Esses agrupamentos são chamados de *clusters* (Leta; Adugna, 2023). Essa análise foi executada no *software Terraview*¹⁰ para evidenciar os regimes espaciais existentes na área de estudo.

Além disso, o índice de Moran permite avaliar a significância estatística da autocorrelação (valor p ou p-value), onde valores de p maiores que 0,05 não são significantes; p= 0,05 tem valor de confiança quanto a autocorrelação de 95%; p=0,01 para confiança de 99% e p=0,001 para confiança de 99,9% (Pereira *et al.*, 2021).

¹⁰ Aplicativo de Sistema de Informações Geográficas desenvolvido pelo INPE.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos com os nove indicadores de vulnerabilidade dos quatro municípios da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca (BHRI) e, em seguida, dos índices calculados para a vulnerabilidade socioambiental e a vulnerabilidade integrada aos fatores tecnológicos.

6.1 Indicadores de Vulnerabilidade a Inundação

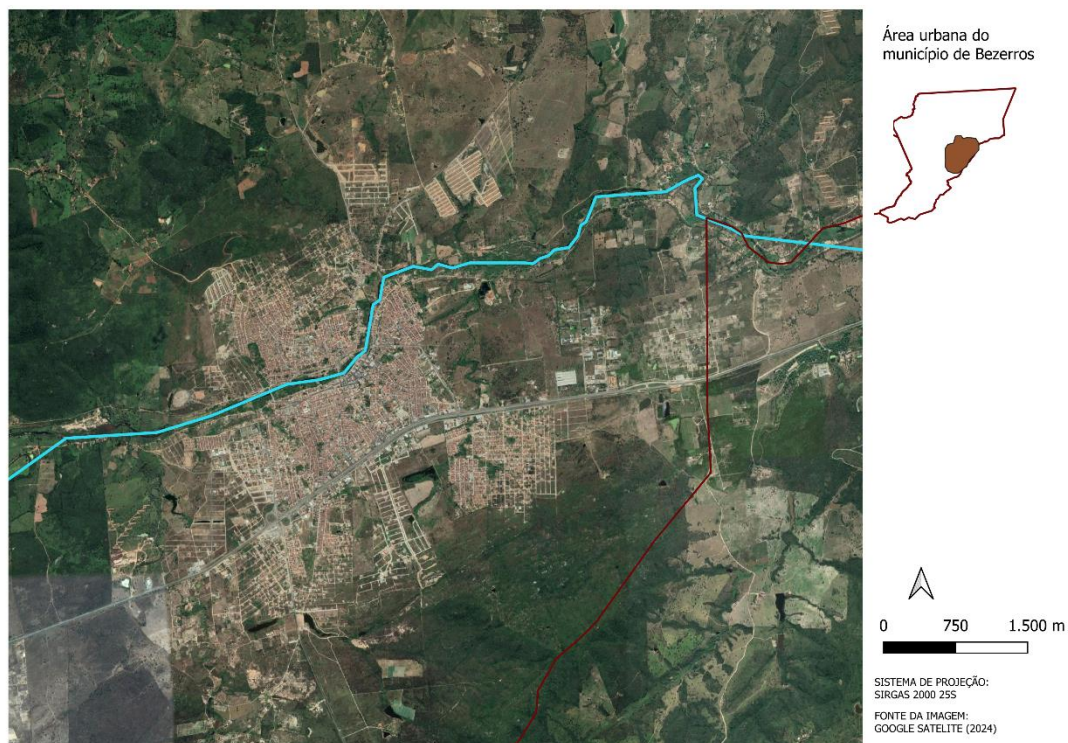
Os índices de vulnerabilidade foram calculados com base na metodologia proposta, além deles, foi possível obter o resultado dos indicadores considerando fatores sociais, ambientais e tecnológicos separadamente. Esse resultado facilita comparações entre os diferentes aspectos e permite uma análise abrangente para compreender o fenômeno. Diante disso, os resultados são apresentados e discutidos nos subitens desta seção.

6.1.1 Indicador social

Para melhor compreensão do indicador social, é importante analisar as variáveis que o compõem. Para dimensão da exposição, os municípios do estudo não apresentaram áreas de alta vulnerabilidade, isso se deve ao fato de que a população do local está distribuída em uma grande área territorial, diminuindo assim sua densidade.

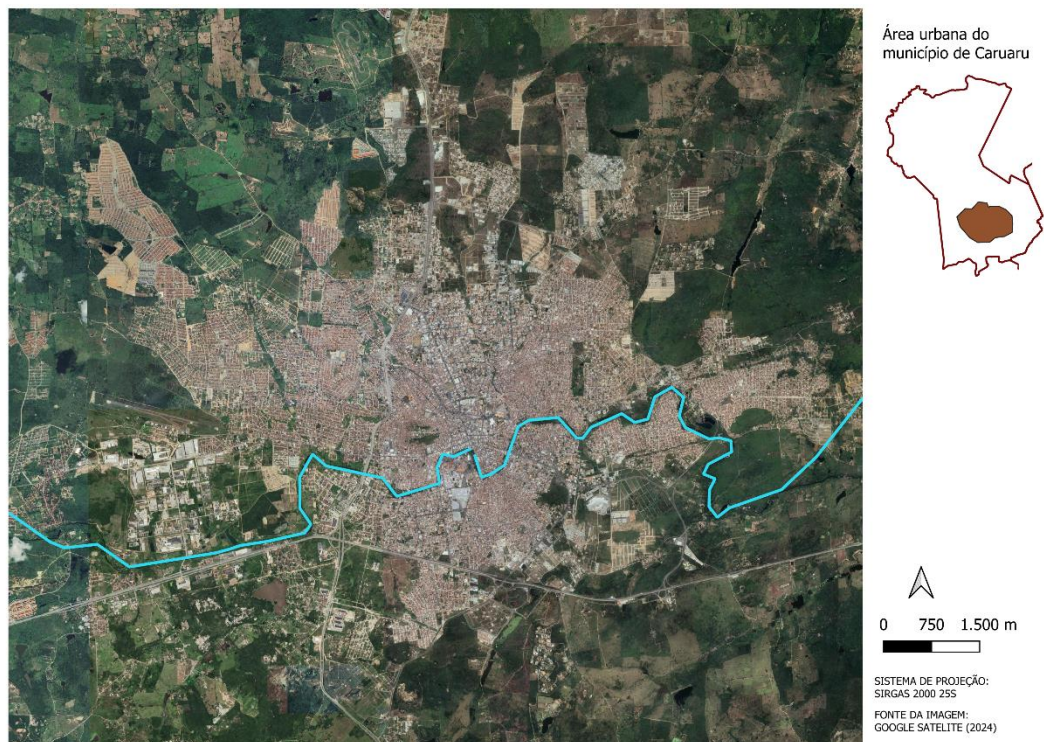
Os quatro municípios apresentaram pequenas áreas com maiores concentrações urbana (Figura 26, 27, 28 e 29), mas apenas Caruaru tem urbanização acima de 80%. Para os demais municípios, a taxa de urbanização fica abaixo de 30% (IBGE, 2020). Entretanto, nas imagens de satélite é possível perceber que as áreas urbanas do município são cortadas pelo Rio Ipojuca, o que influencia na natureza da exposição dessas áreas.

Figura 26 – Área de concentração urbana do município de Bezerros.



Fonte: Autora (2024).

Figura 27 – Área de concentração urbana do município de Caruaru.



Fonte: Autora (2024).

Figura 28 – Área de concentração urbana do município de Escada.



Fonte: Autora (2024).

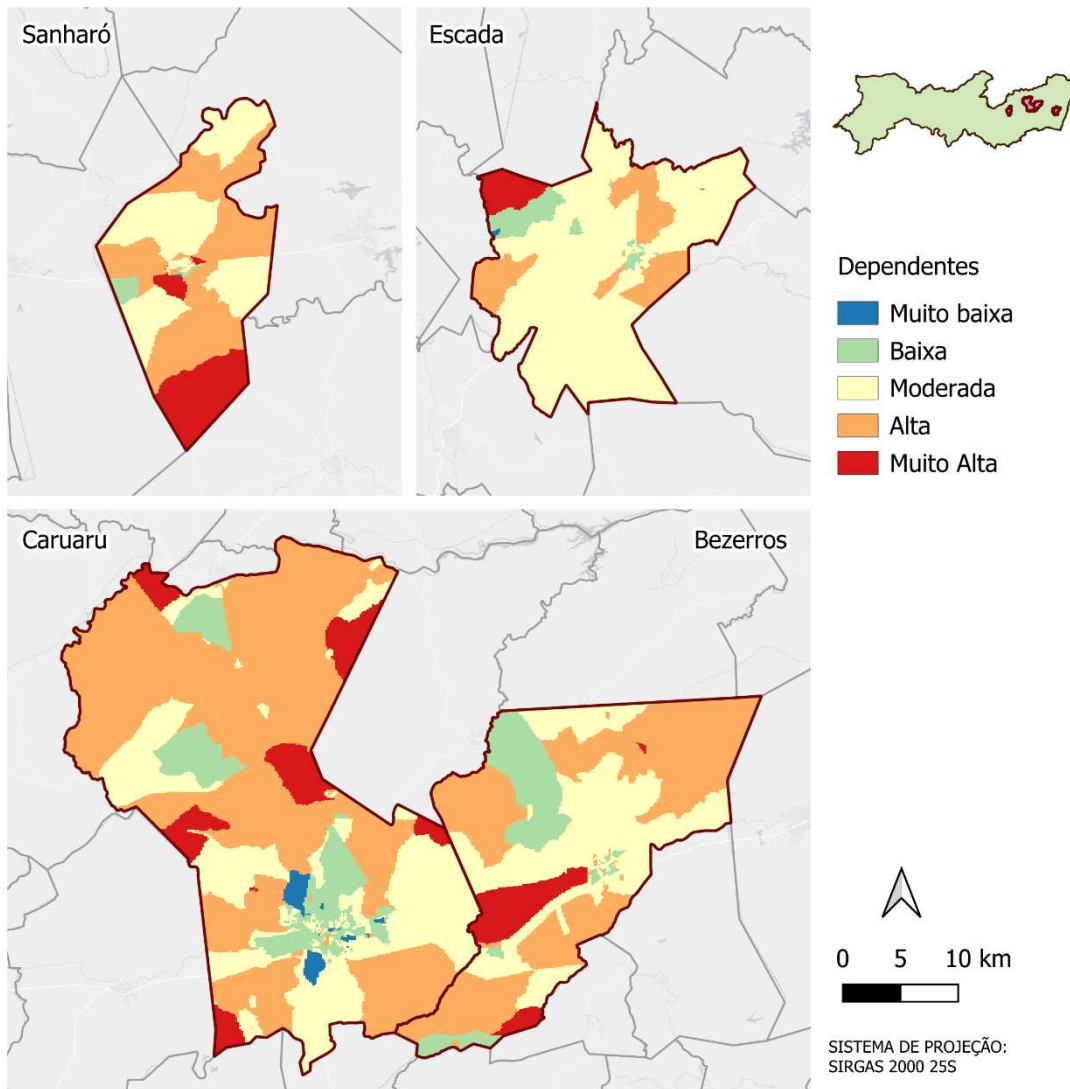
Figura 29 – Área de concentração urbana do município de Sanharó.



Fonte: Autora (2024).

Para os fatores de sensibilidade, a maior parte dos municípios apresentou vulnerabilidade moderada a alta, quanto ao número de dependentes (Figura 30). Isso ocorreu devido ao número de pessoas dependentes e com renda baixa ser alto em relação à população total na mesma área.

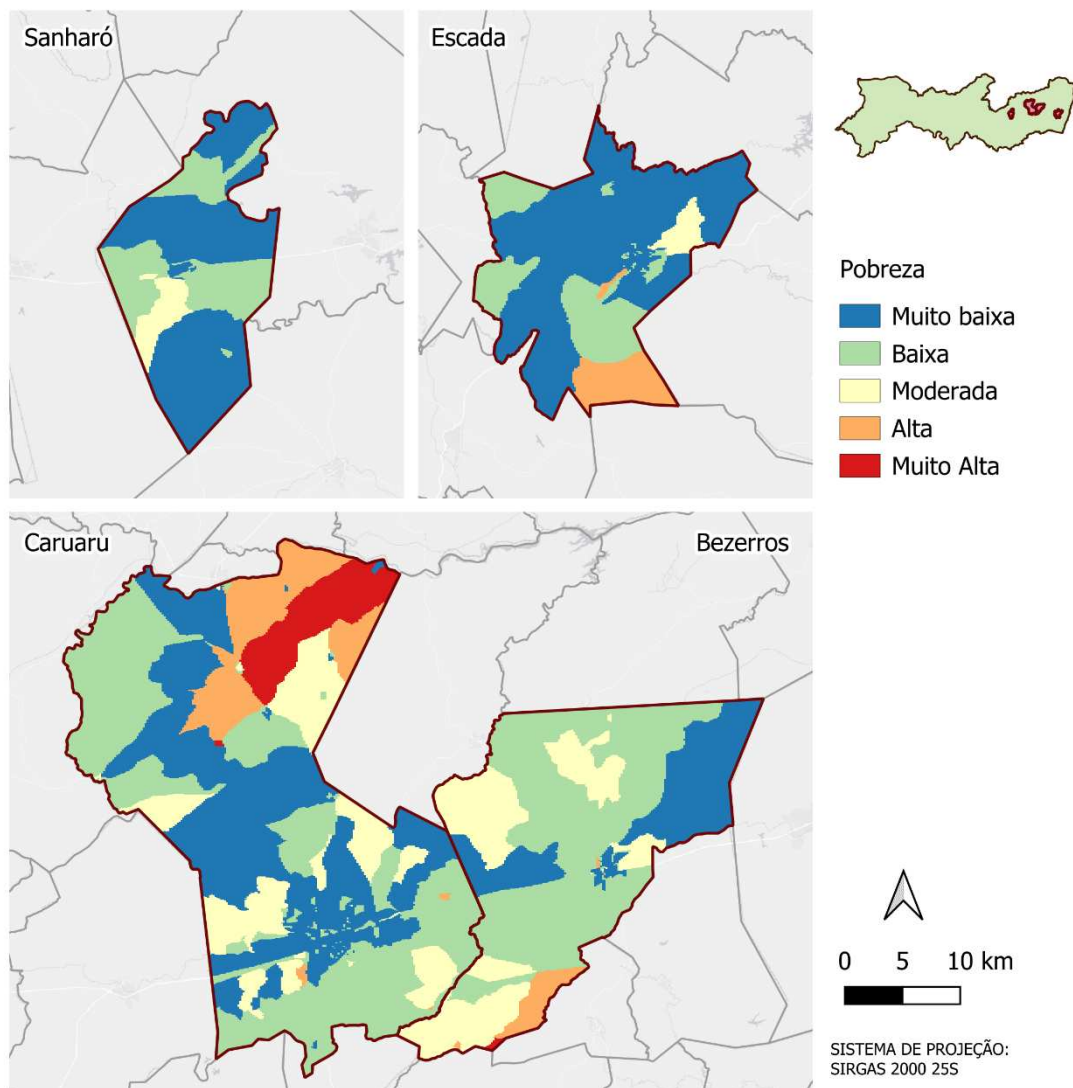
Figura 30 – Variável de sensibilidade social: dependentes.



Fonte: Autora (2024).

Com relação a pobreza, as áreas que apresentaram maior vulnerabilidade (Figura 31) estão localizadas na parte noroeste do município de Caruaru e na parte sul do município de Bezerros. Nos dois casos, essas áreas têm cerca de 40% da sua população com renda abaixo de 1/4 de salário-mínimo per capita no domicílio e na faixa etária considerada como dependente (idade < 14 e idade > 60 anos).

Figura 31 – Variável de sensibilidade social: pobreza.

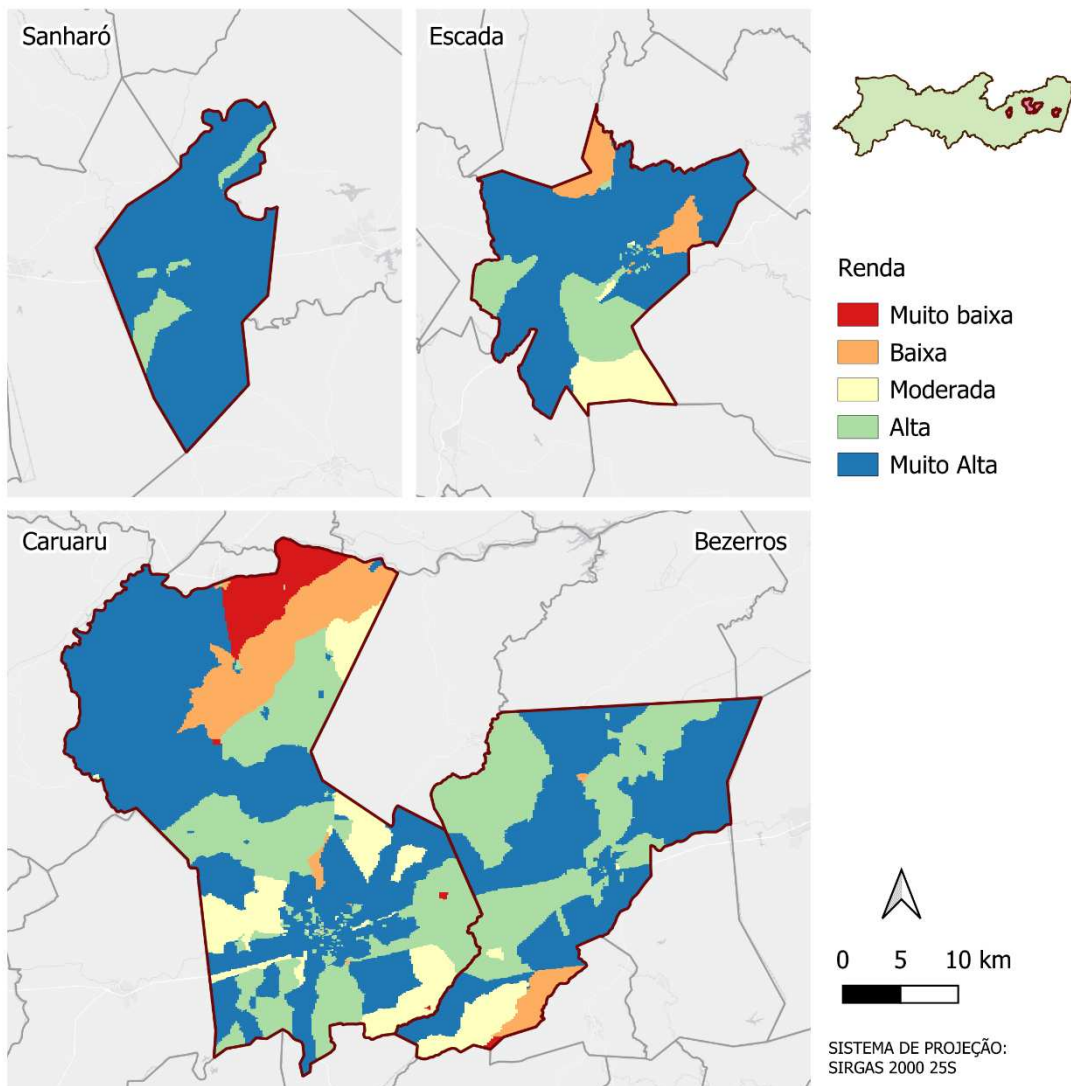


Fonte: Autora (2024).

Os fatores de educação e renda estão relacionados à capacidade da população de compreender informações, aprender medidas preventivas e ações de emergência para mitigar os danos em caso de desastres, bem como a qualidade de vida, acesso a serviços essenciais e poder aquisitivo para recuperação após o evento (Vasconcelos, 2019).

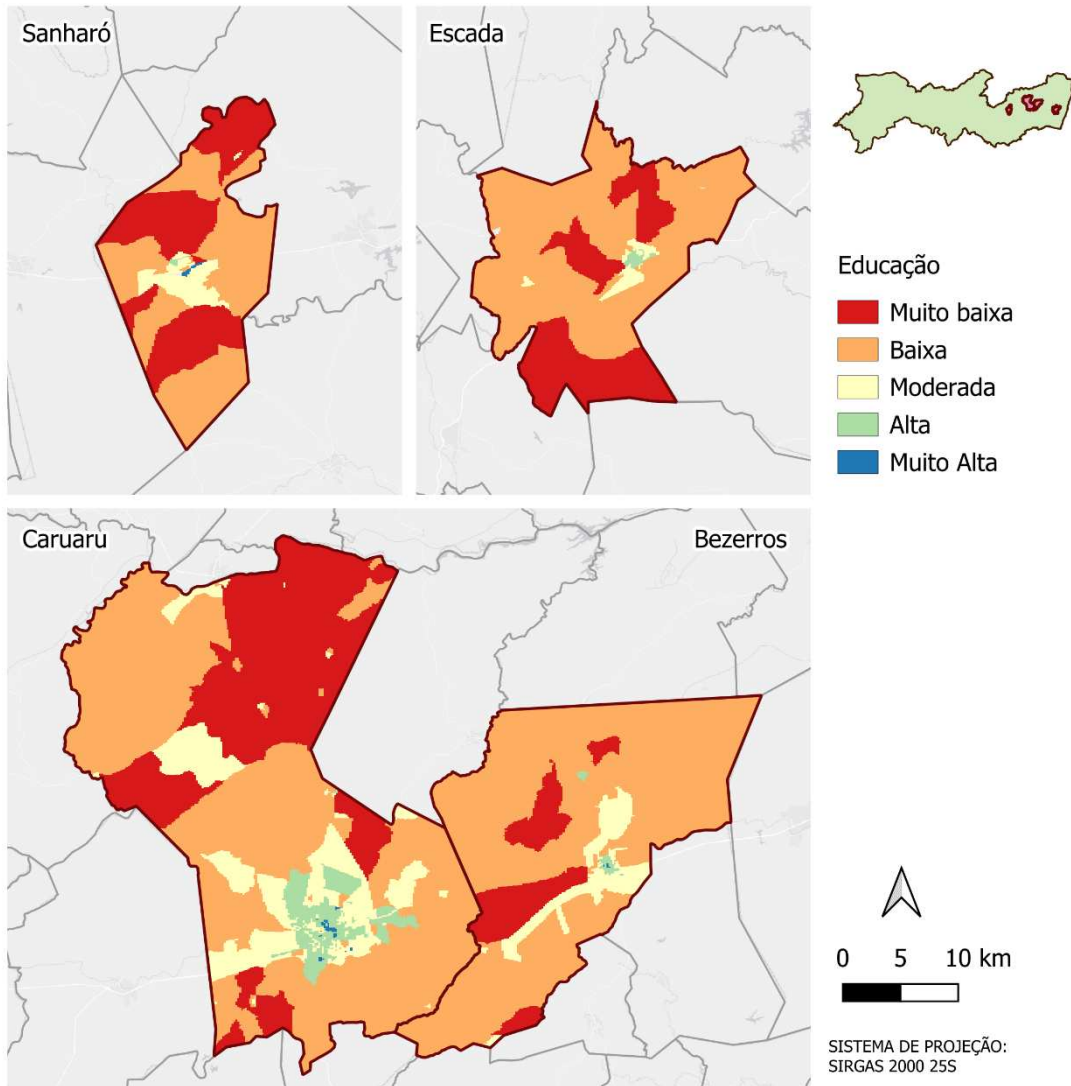
Os municípios estudados apresentam capacidade de adaptação social heterogênea. Quanto à renda (Figura 32), apenas Caruaru tem áreas de muito baixa capacidade de adaptação, e Bezerros e Escada, poucas áreas de moderada a baixa. Já com relação à educação (Figura 33), os municípios apresentam a maior parte de seu território com áreas de muito baixa a moderada capacidade de adaptação. As áreas com maior capacidade de adaptação em relação ao número de pessoas alfabetizadas e essas estão localizadas mais próximas aos centros urbanos.

Figura 32 – Variável de capacidade de adaptação social: renda.



Fonte: Autora (2024).

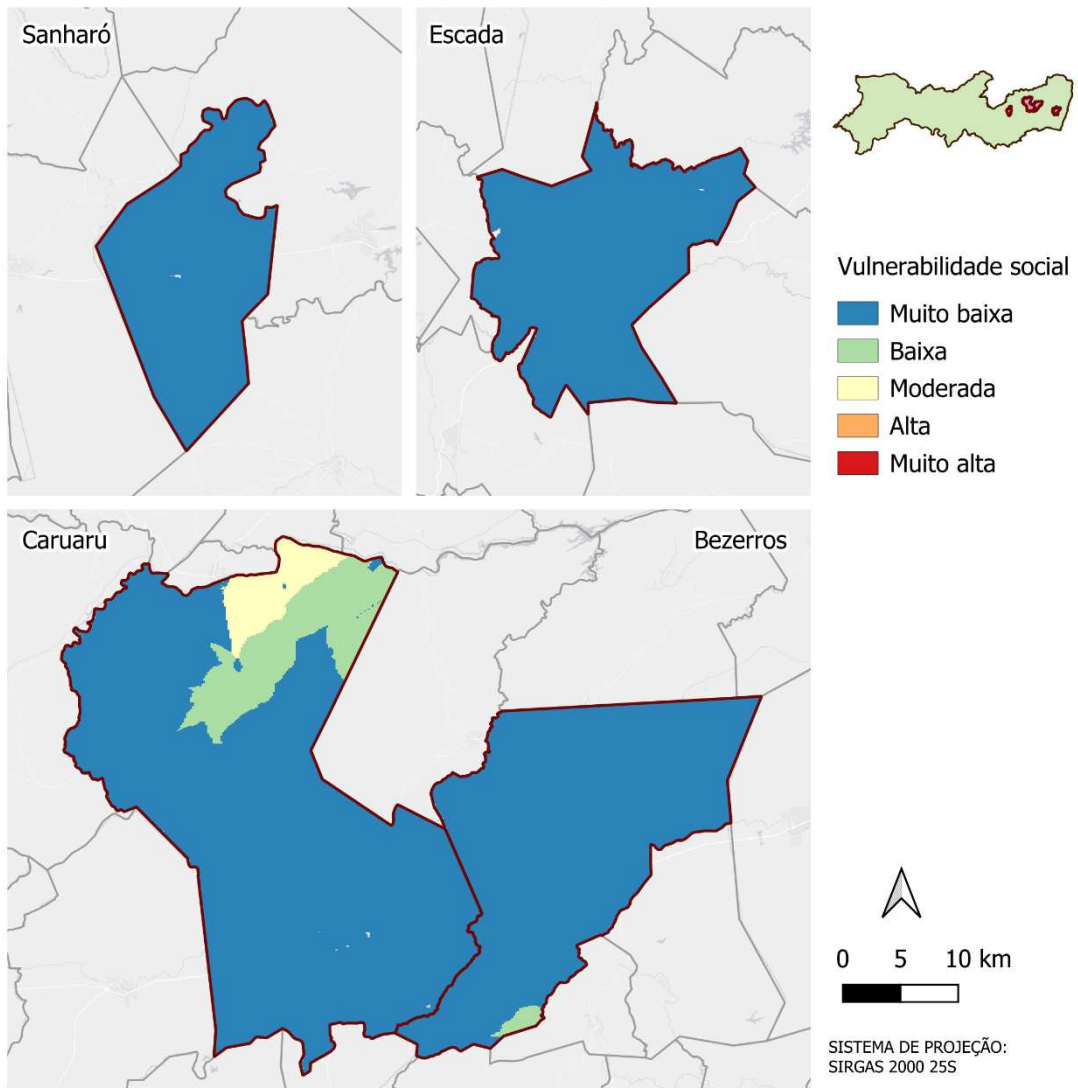
Figura 33 – Variável de capacidade de adaptação social: educação.



Fonte: Autora (2024).

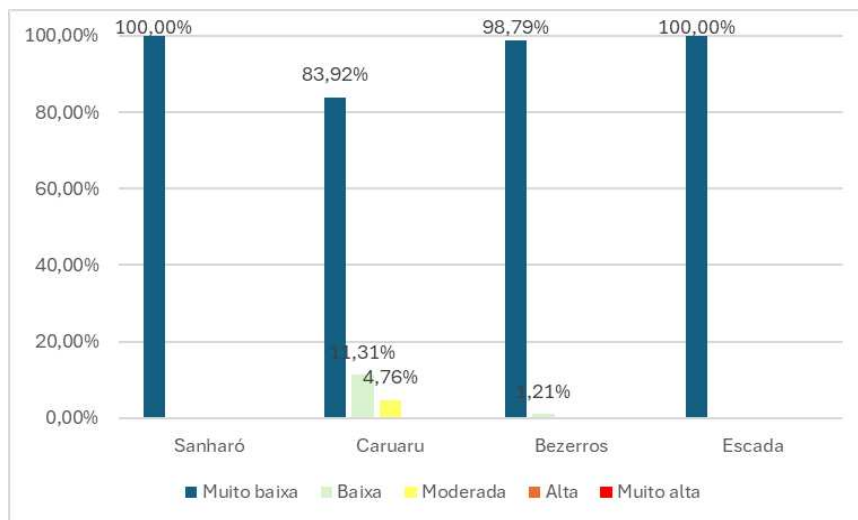
O índice de vulnerabilidade social (Figura 34 e gráfico 4) resultou em valores de muito baixa a moderada vulnerabilidade. Sendo o município de Caruaru o único com áreas de vulnerabilidade moderada (4,76%) e baixa (11,31%), e Bezerros com uma região de baixa vulnerabilidade que corresponde a apenas 1,21% do seu território. Os demais municípios têm índices de muito baixa vulnerabilidade social.

Figura 34 – Indicador de Vulnerabilidade Social.



Fonte: Autora (2024).

Gráfico 4 – Percentuais de classes de vulnerabilidade para o Indicador Social.

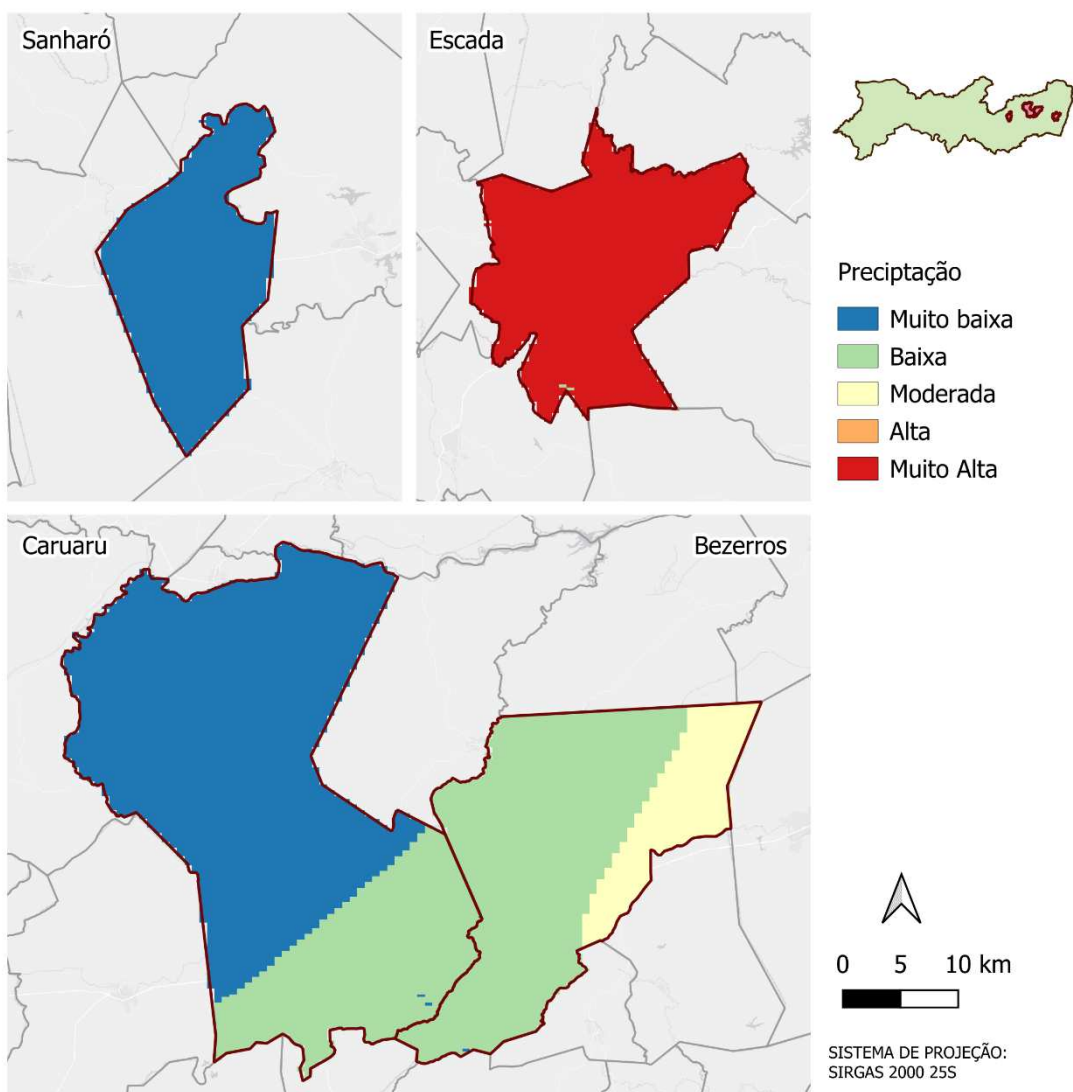


Fonte: Autora (2024).

6.1.2 Indicador Ambiental

A exposição ambiental apresentou resultado com áreas de muito baixa a muito alta vulnerabilidade com relação a precipitação (Figura 35), isso ocorreu devido ao fato de os municípios do estudo estarem em diferentes regiões do estado. O estado de Pernambuco tem alta variabilidade interanual dos índices de chuva, o que faz com que não apenas as chuvas ao longo do ano sejam diferentes em cada região, mas seus volumes variem de ano para ano (Lacerda *et al.*, 2015).

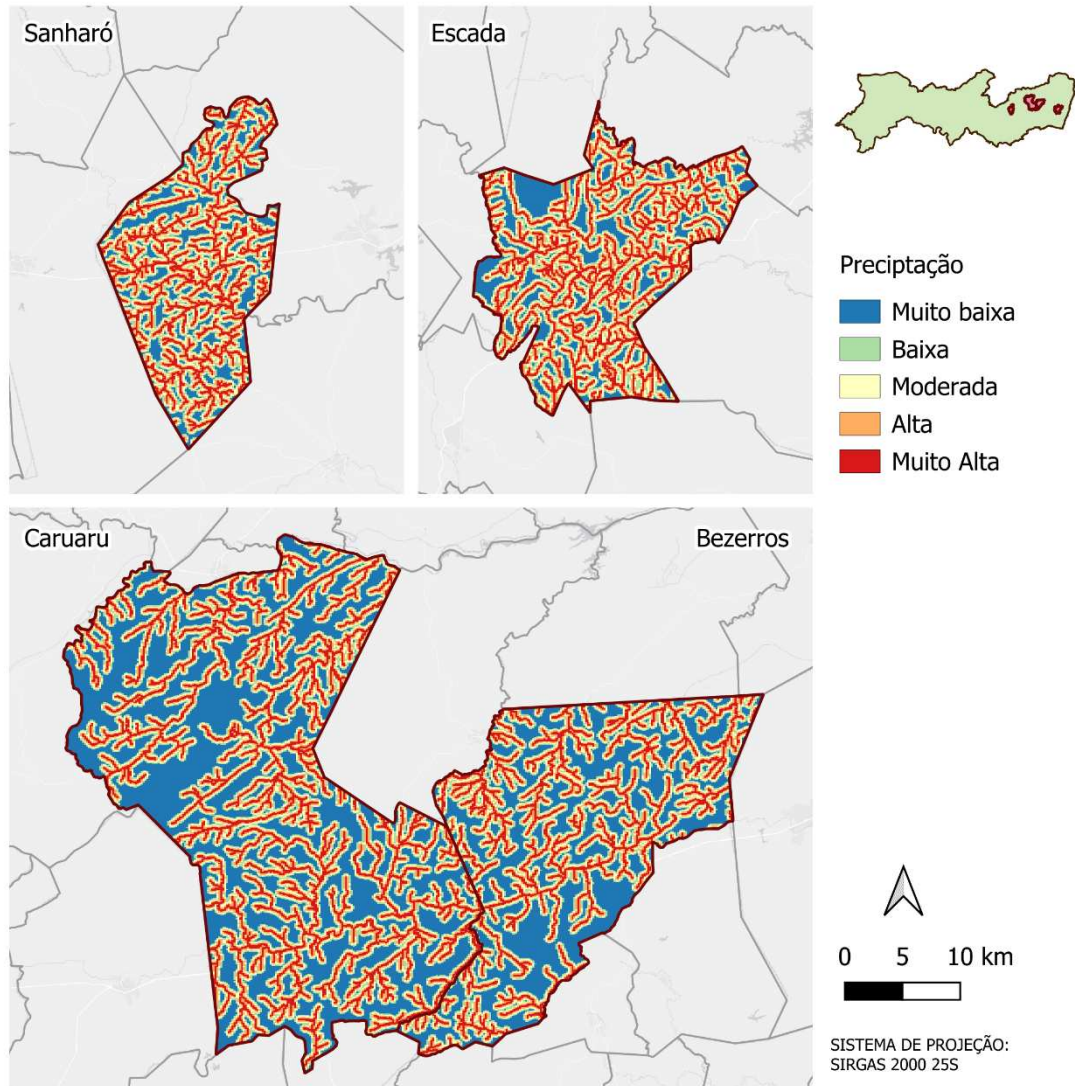
Figura 35 – Variável de exposição ambiental: precipitação.



Fonte: Autora (2024).

Apesar de apresentar uma alta densidade de corpos hídricos (Figura 36) - que aumenta a exposição ambiental - Sanharó, Caruaru e Bezerros estão na região do Agreste Pernambucano, região de clima quente e seco com poucas chuvas ao longo do ano. Já Escada faz parte da Zona da Mata, com clima quente e úmido e alta pluviosidade, devido a isso o município de Escada apresenta maior vulnerabilidade em função da exposição ambiental.

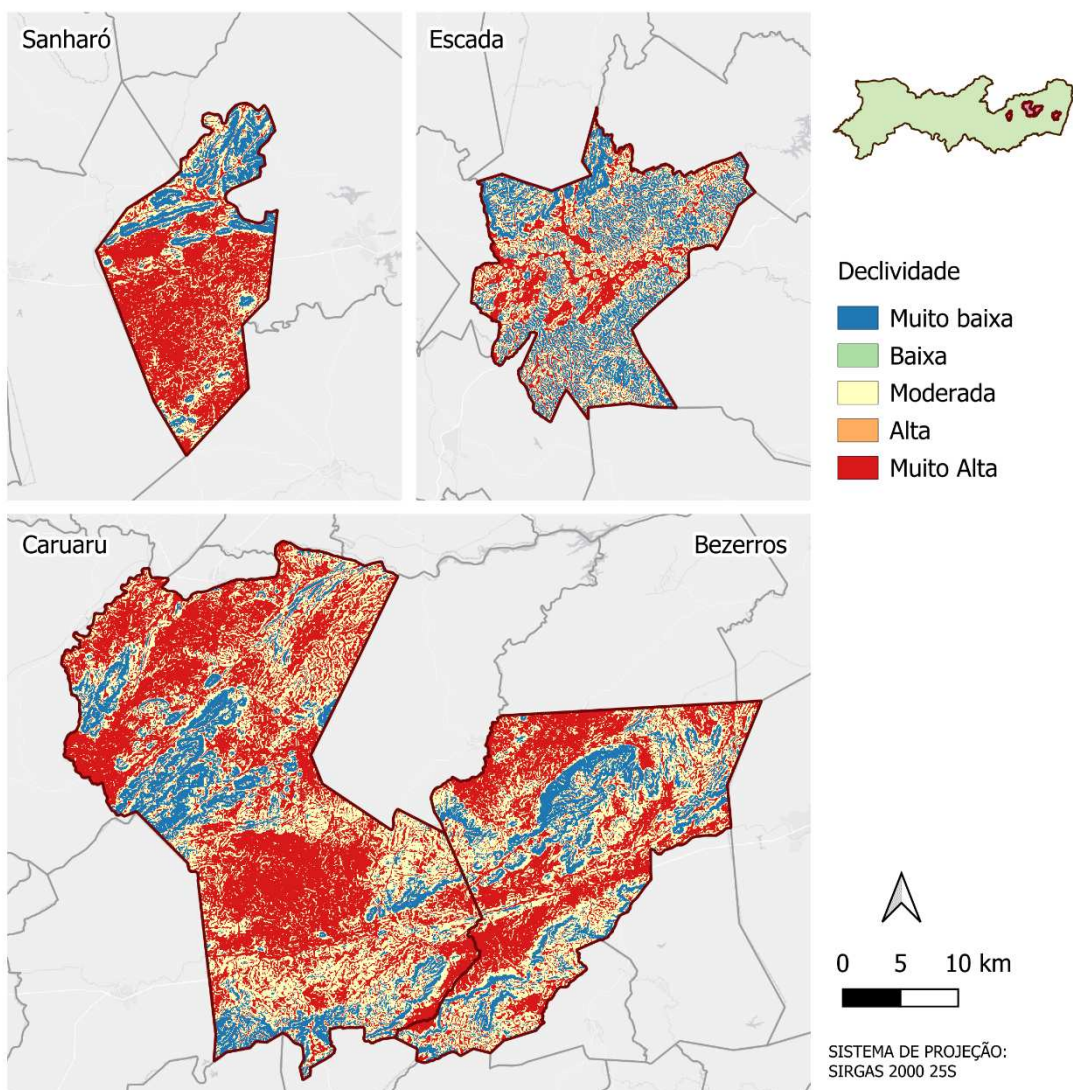
Figura 36 – Variável de exposição ambiental: distância de recursos hídricos.



Fonte: Autora (2024).

Os parâmetros de sensibilidade ambiental estão relacionados principalmente às áreas mais sensíveis a eventos de inundações. Nesta análise, todos os municípios apresentam áreas de moderada e alta vulnerabilidade com relação à declividade (Figura 37), um fator que pode dificultar o escoamento devido ao relevo mais plano (Pathan *et al.*, 2022).

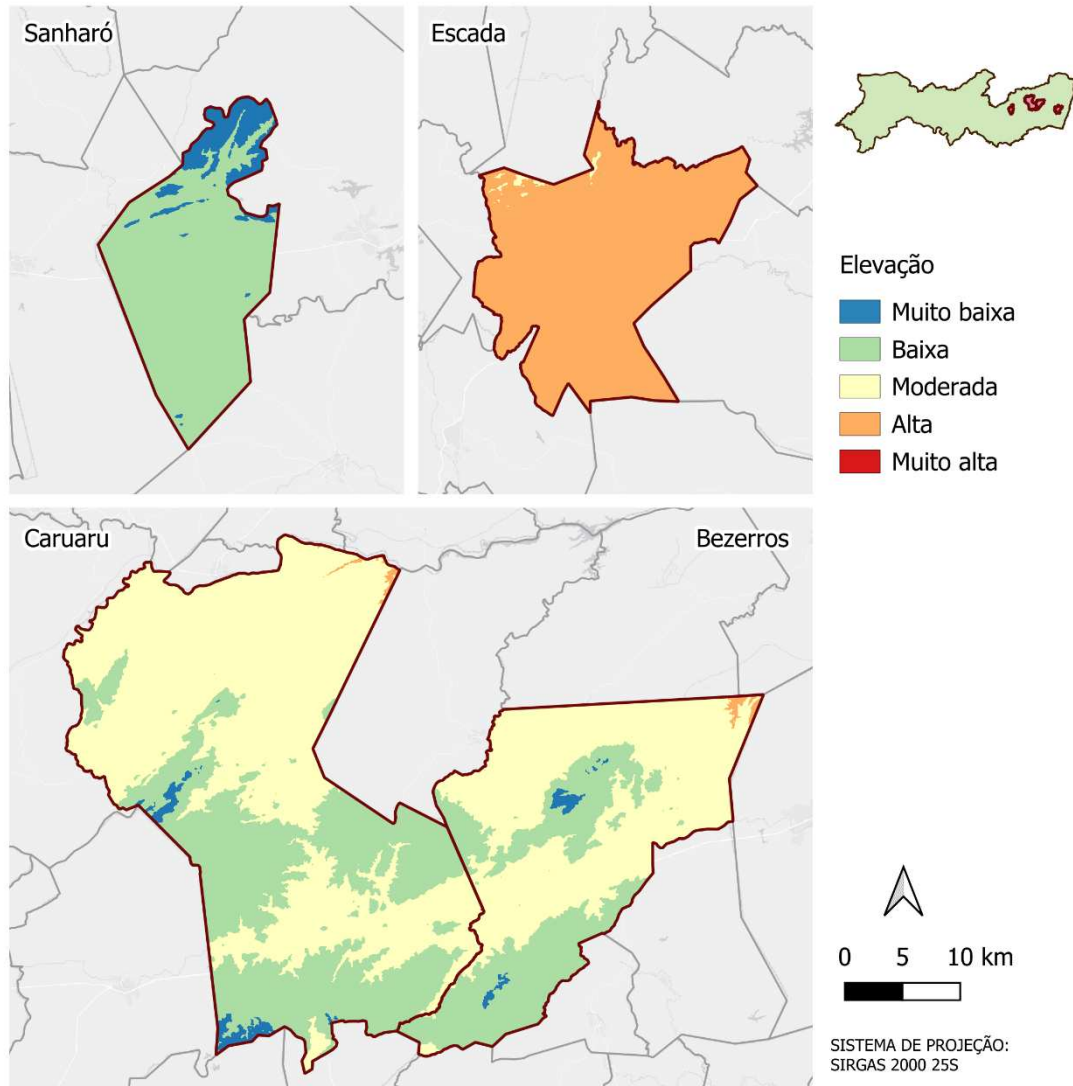
Figura 37 – Variável sensibilidade ambiental: declividade.



Fonte: Autora (2024).

Com relação a elevação (Figura 38), Sanharó possui os menores índices por estar localizado no Planalto da Borborema, região com altitudes variando de 650 a 1000 metros. Caruaru e Bezerros têm áreas de baixa e média vulnerabilidade, e Escada apresenta a maior exposição ambiental devido à sua localização em área predominantemente de planície (CPRM, 2005).

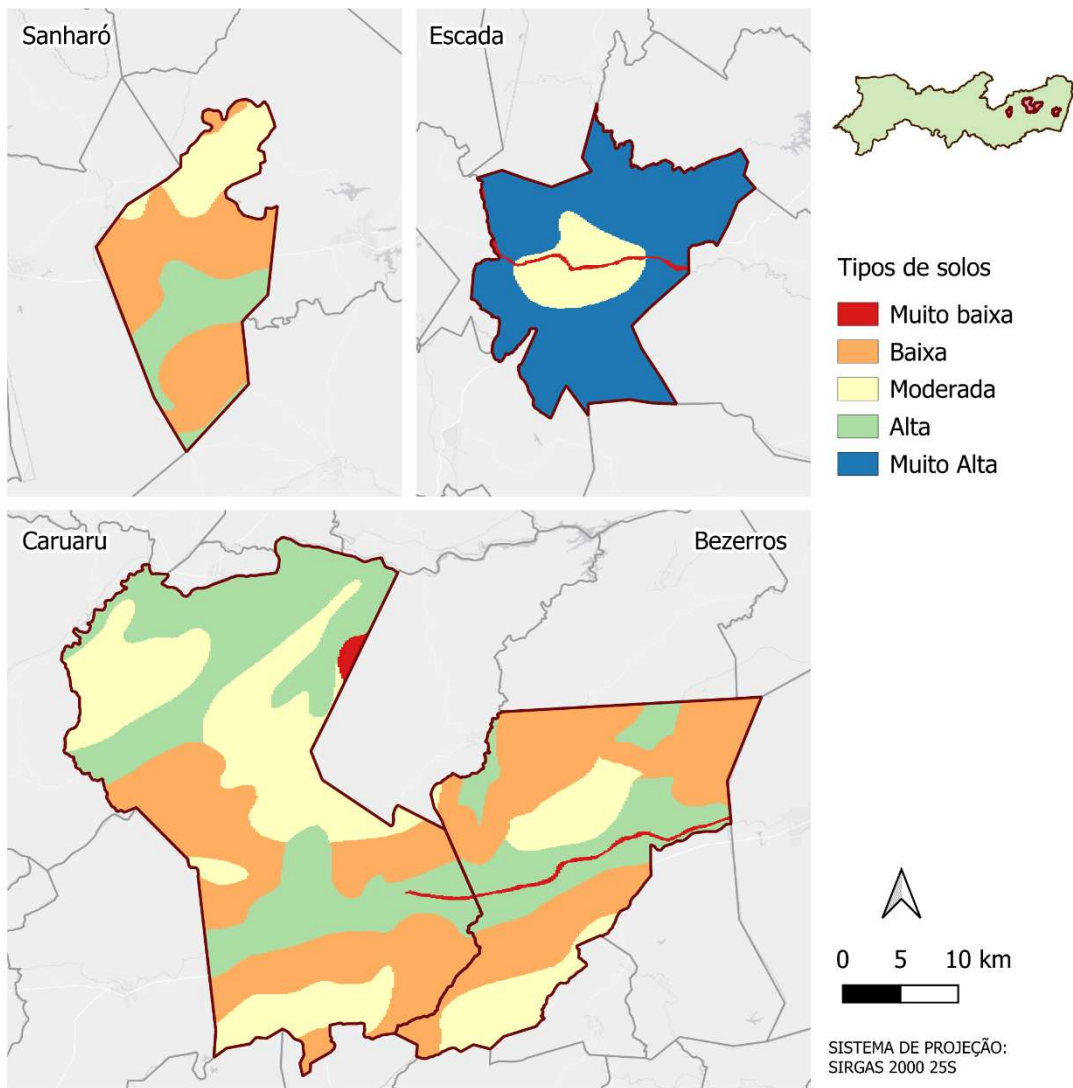
Figura 38 – Variável sensibilidade ambiental: declividade.



Fonte: Autora (2024).

Os índices referentes aos tipos de solo encontrados (Figura 39) na área de estudo foram variados. No município de Escada, percebeu-se a predominância de áreas com alta capacidade de adaptação e isso ocorreu principalmente pela dominância do latossolo, que é um solo poroso e de boa drenagem, podendo absorver a água de forma mais rápida (Ouma; Tateishi, 2014).

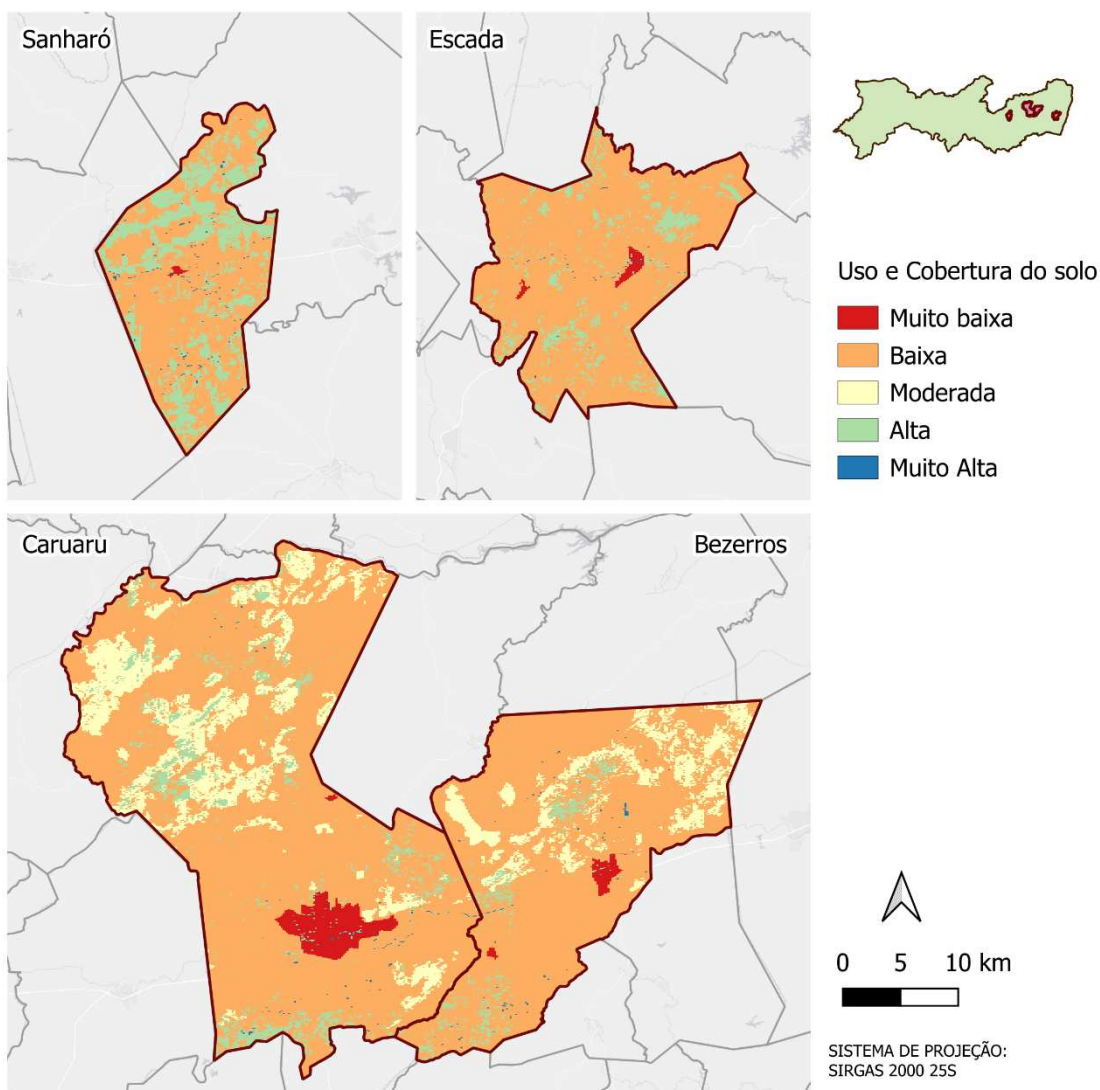
Figura 39 – Variável de capacidade de adaptação ambiental: tipos de solos.



Fonte: Autora (2024).

Enquanto nos outros três municípios, a maior parte da área é de moderada e baixa capacidade de adaptação com relação aos tipos de solos, para o uso e cobertura do solo (Figura 40), houve maior ocorrência de áreas de moderada capacidade de adaptação, principalmente devido aos municípios terem a maior parte do seu território de áreas antropizadas.

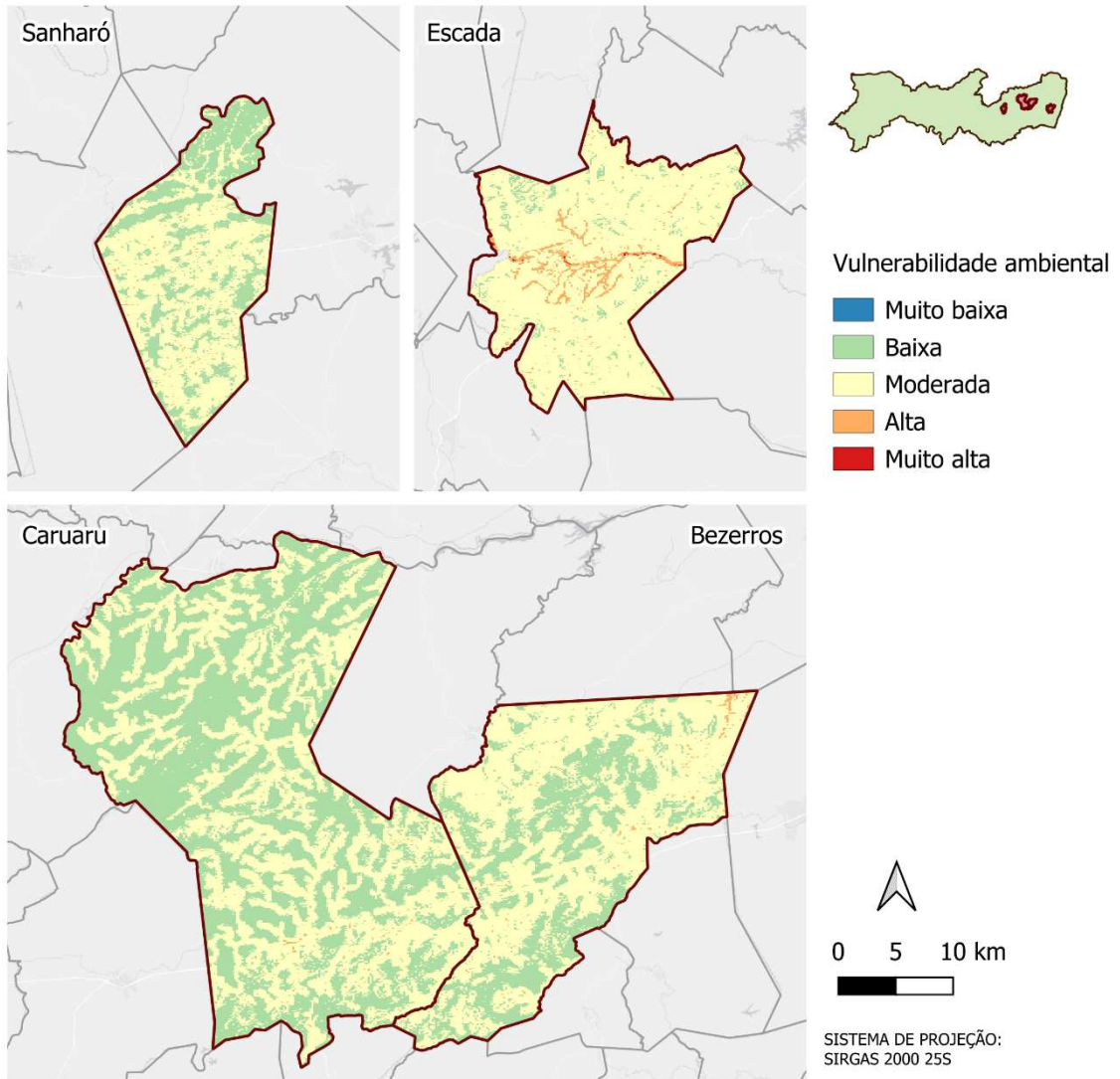
Figura 40 – Variável de capacidade de adaptação ambiental: uso e cobertura do solo.



Fonte: Autora (2024).

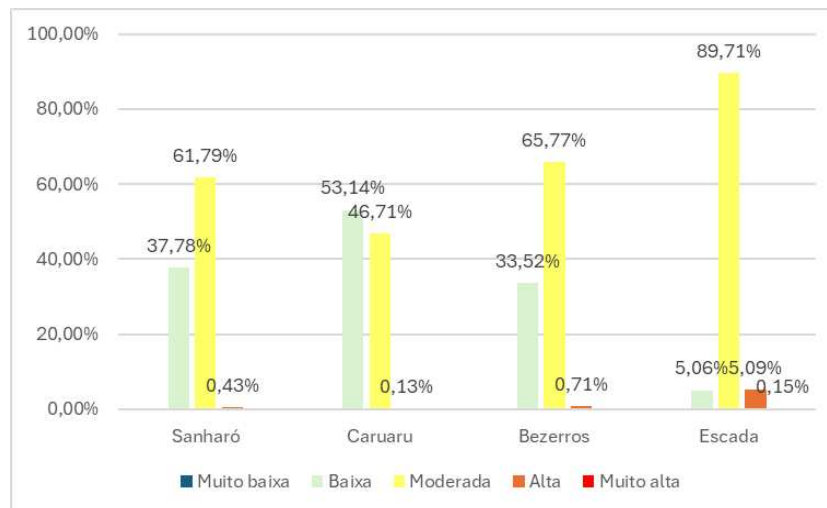
O indicador de vulnerabilidade ambiental (Figura 41) teve como resultado valores de baixa e moderada vulnerabilidade. O município de Escada apresentou áreas de alta (5,09%) e muito alta (0,15%) vulnerabilidade devido ao fato de ser o município mais afetado pelas chuvas e com elevação favorável a inundações. Alguns pontos de alta vulnerabilidade também ocorreram em Bezerros (0,71%) e Caruaru (0,13%) (Gráfico 5).

Figura 41 – Indicador de Vulnerabilidade Ambiental.



Fonte: Autora (2024).

Gráfico 5 – Percentuais de classes de vulnerabilidade para o Indicador Ambiental.

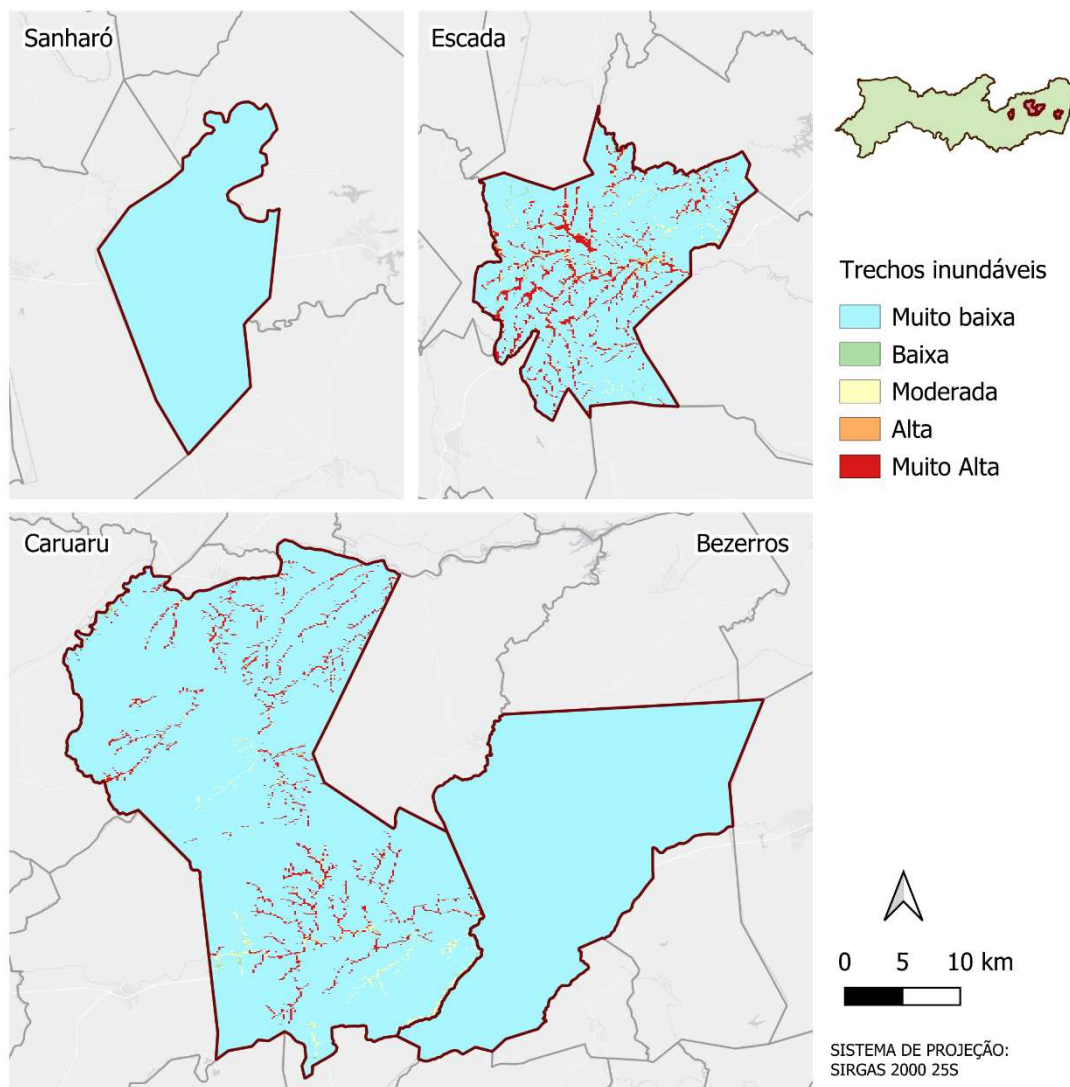


Fonte: Autora (2024).

6.1.3 Indicador Tecnológico

Para exposição tecnológica (Figura 42), os municípios de Bezerros e Sanharó apresentaram apenas áreas de muito baixa vulnerabilidade, isso se deve ao fato de não existirem trechos considerados como área de risco de inundação pelo mapa da ANA. Contudo, Bezerros teve eventos de inundações no ano de 2018 e Sanharó nos anos de 2020 e 2021. Para Andrade e Szlafsztein (2018), a ausência de áreas consideradas de risco ou experiências prévias com desastres podem influenciar na percepção do risco pela comunidade e no conhecimento sobre ações de prevenção e resposta no caso de um acontecimento.

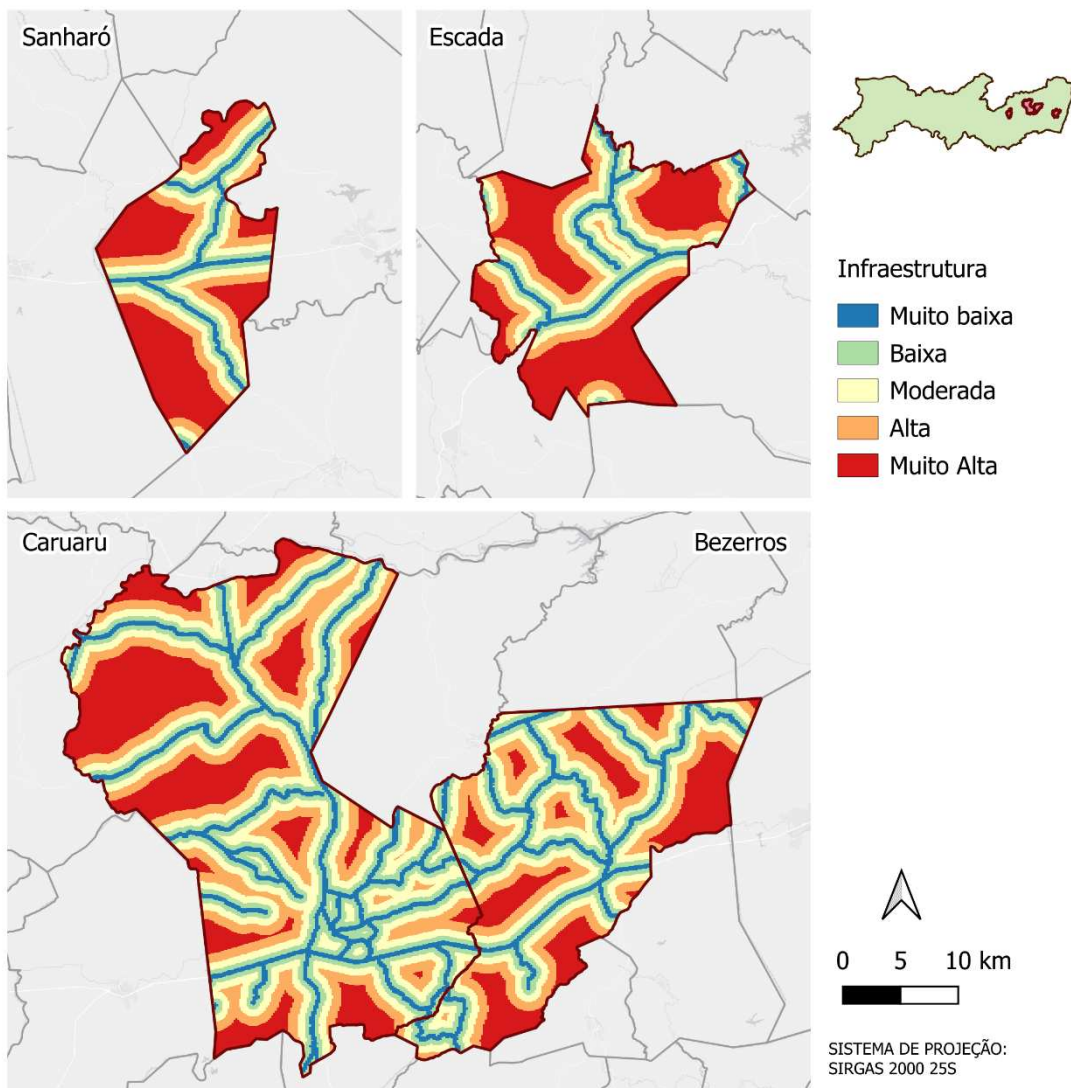
Figura 42 – Variável de exposição tecnológica: trechos inundáveis.



Fonte: Autora (2024).

A sensibilidade tecnológica (Figura 43) é um fator de grande importância para análise de vulnerabilidade a inundações porque a rede de rodovias e estradas de uma região serve tanto como meio de evacuação da área de risco como meio de acesso por serviços de resgate e socorro (Pathan *et al.*, 2022). As áreas dos municípios estudados apresentaram muito baixa ou baixa sensibilidade devido à existência de uma malha viária densa no estado, porém regiões mais afastadas do centro têm muito alta vulnerabilidade com relação a este fator.

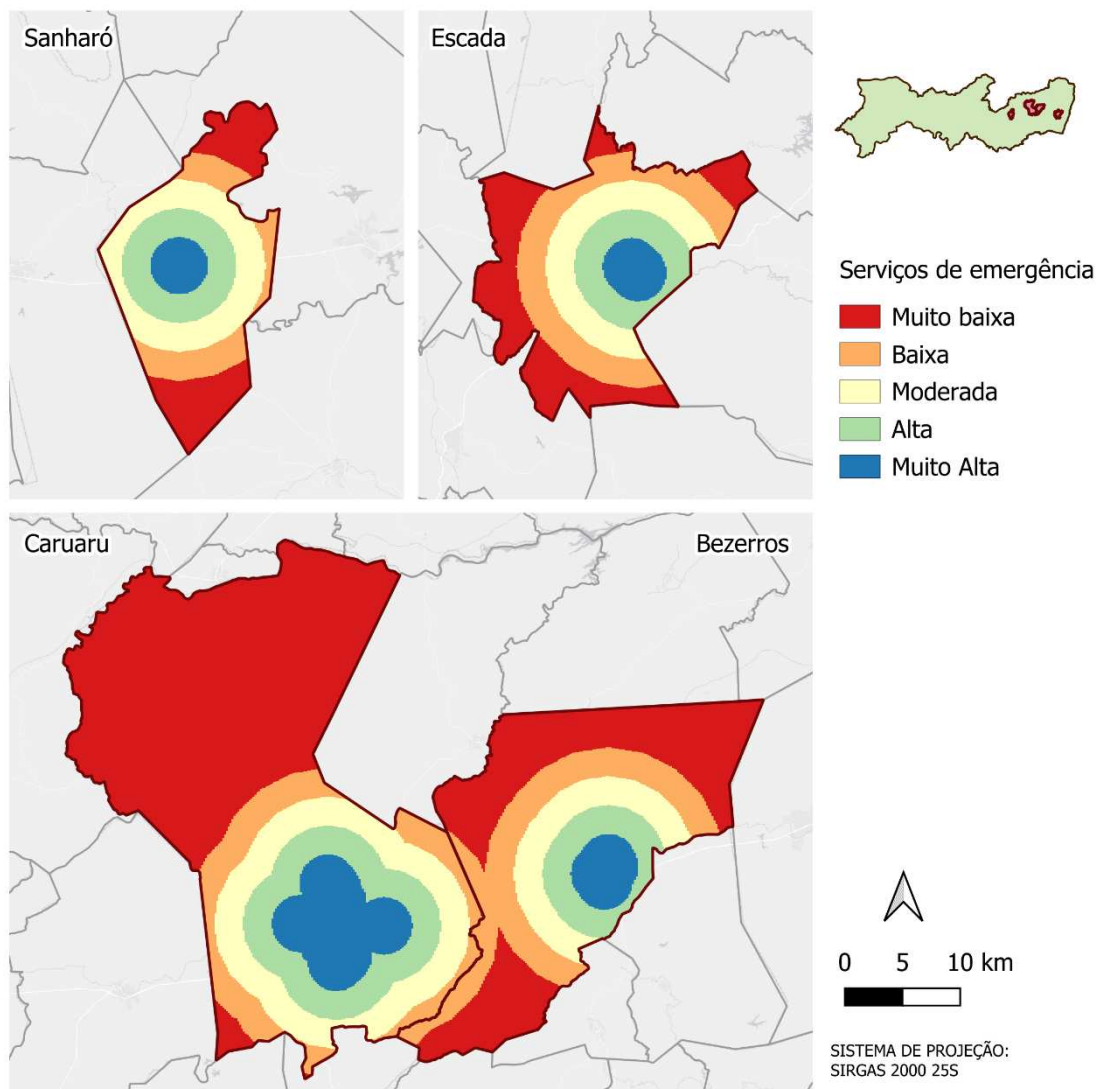
Figura 43 – Variável de sensibilidade tecnológica: infraestrutura.



Fonte: Autora (2024).

Os serviços de saúde (Figura 44) são importantes para prevenção e enfrentamento de catástrofes, eles atuam na prevenção de doenças, promoção de higiene e no atendimento em casos de emergência (Pathan *et al.*, 2022). Os quatro municípios do estudo possuem unidades de saúde, contudo esses serviços estão localizados próximo aos centros urbanos, deixando a população que está mais afastada com maior dificuldade de acesso.

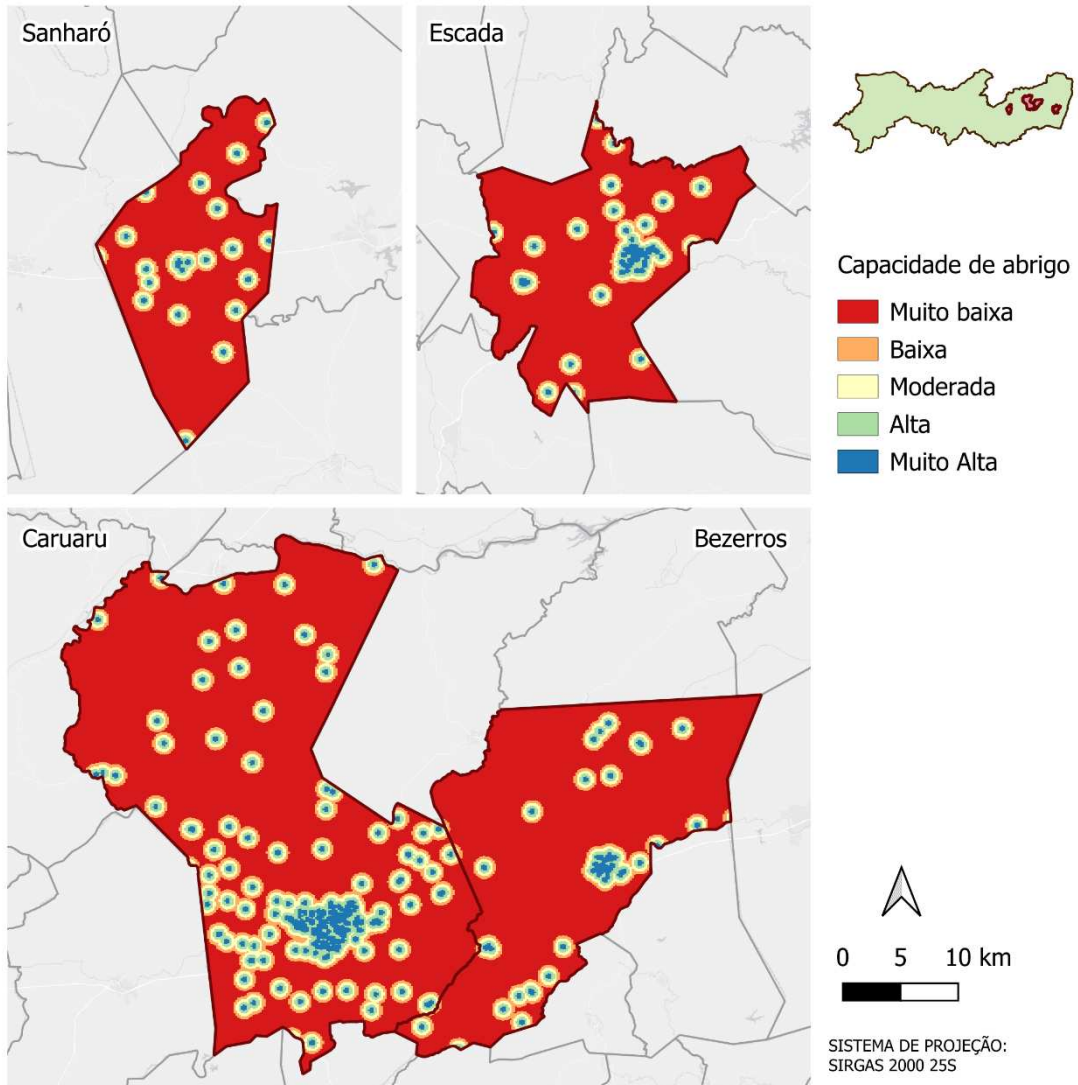
Figura 44 – Variável de capacidade de adaptação tecnológica: serviços de emergência.



Fonte: Autora (2024).

Com relação a escolas, os pontos estão bem distribuídos, ainda assim, os municípios apresentam menores capacidades de adaptação nesse aspecto para as regiões mais afastadas do centro (Figura 45).

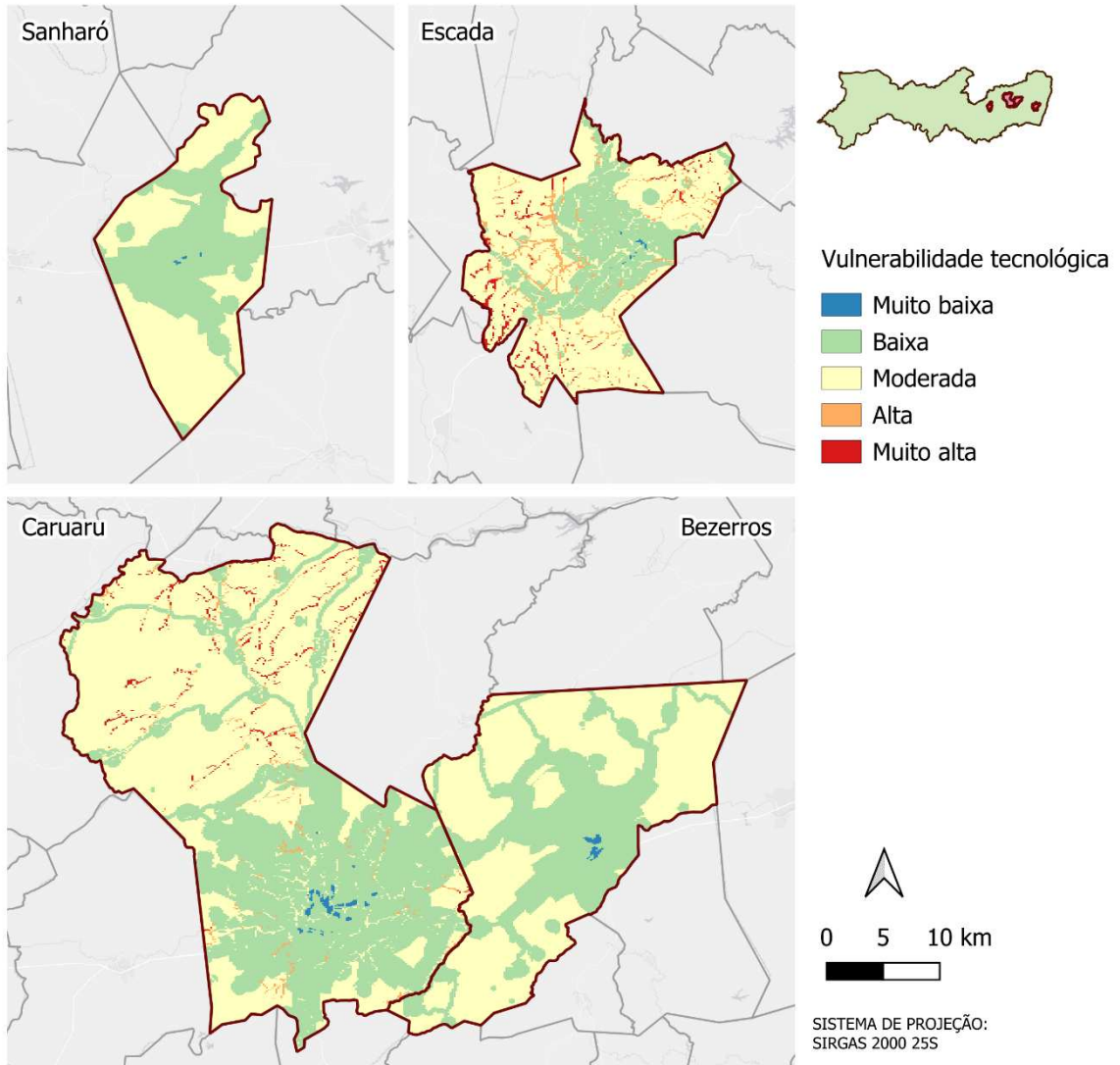
Figura 45 – Variável de capacidade de adaptação tecnológica: capacidade de abrigo.



Fonte: Autora (2024).

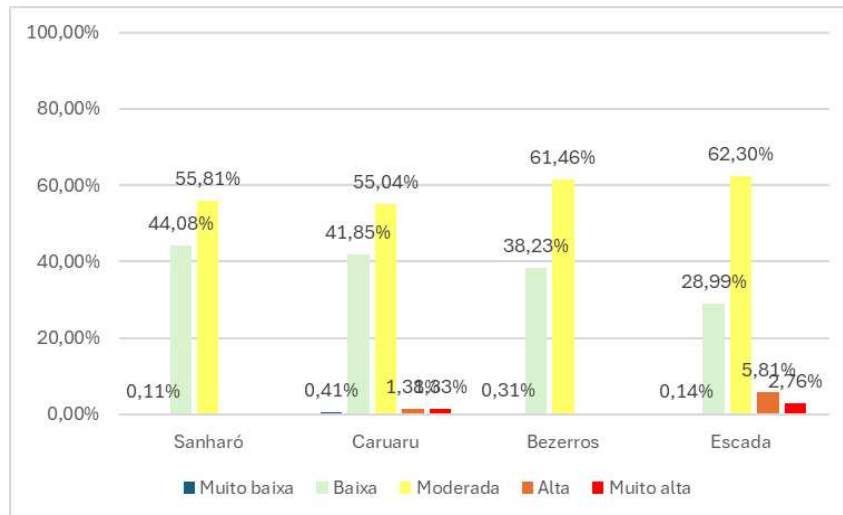
Quanto à vulnerabilidade tecnológica (Figura 46), Caruaru apresentou 1,38% de áreas de alta vulnerabilidade e 1,33% de muito alta. Escada teve um percentual maior de áreas de alta e muito alta vulnerabilidade, 5,81% e 2,76%. Essas áreas se encontram principalmente nos limites do município, mais afastados de seus centros urbanos. Os outros municípios e demais áreas tiveram vulnerabilidade baixa e moderada. As áreas de muito baixa vulnerabilidade quanto aos fatores tecnológicos ocorreram nos quatro municípios, contudo, em áreas pequenas e localizadas em seus centros urbanos: 0,11% em Sanharó; 0,41% em Caruaru; 0,31% em Bezerros e 0,14% em Escada (Gráfico 6).

Figura 46 – Indicador de Vulnerabilidade Tecnológica.



Fonte: Autora (2024).

Gráfico 6 – Percentuais de classes de vulnerabilidade para o Indicador Tecnológico.



Fonte: Autora (2024).

6.2 Cálculo da vulnerabilidade e análise espacial

Os resultados do IVSA e do IVSAT, tiveram padrões espaciais semelhantes. Contudo, com a inclusão dos fatores tecnológicos, percebe-se a diminuição de áreas de índices de baixa e moderada vulnerabilidade. Já na classe de alta vulnerabilidade, essas áreas aumentaram.

A pequena variação de um índice para outro também ocorreu no trabalho de Barros, Mendes e Castro (2015), que avaliou a vulnerabilidade socioambiental a inundação para área urbana de Londrina/PR considerando aspectos de infraestrutura. No mesmo estudo, percebeu-se que os valores mais altos de vulnerabilidade estão nas áreas mais afastadas das concentrações urbanas e quando considerado variáveis de infraestrutura ocorreu o aumento da vulnerabilidade nessas áreas (Barros; Mendes; Castro, 2015).

Semelhante ao caso avaliado em Londrina, o incremento da vulnerabilidade com a inclusão dos fatores tecnológicos também ocorreu nos municípios do estudo. Em Caruaru, as áreas de alta vulnerabilidade aumentaram de 2,43 para 21,50%; em Bezerros, de 1,23 para 24,66%, e Sanharó, que não teve alta vulnerabilidade para o IVSA, teve quase 6% de área de alta vulnerabilidade a inundações (Tabela 1 e Tabela 2).

Tabela 1 – Relação de áreas por classe de vulnerabilidade (IVSA).

Classe de vulnerabilidade	Bezerros		Caruaru		Escada		Sanharó	
	Área (km ²)	Perc. (%)	Área (km ²)	Perc. (%)	Área (km ²)	Perc. (%)	Área (km ²)	Perc. (%)
Muito baixa	-	-	-	-	-	-	-	-
Baixa	21,96	4,51	135,54	14,81	306,63	90,96	38,27	4,51
Moderada	459,07	94,26	757,31	82,76	30,47	9,04	247,97	92,42
Alta	6,01	1,23	22,21	2,43	-	-	-	-
Muito alta	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autora (2024).

Tabela 2 – Relação de áreas por classe de vulnerabilidade (IVSAT).

Classe de vulnerabilidade	Bezerros		Caruaru		Escada		Sanharó	
	Área (km ²)	Perc. (%)	Área (km ²)	Perc. (%)	Área (km ²)	Perc. (%)	Área (km ²)	Perc. (%)
Muito baixa	-	-	-	-	-	-	-	-
Baixa	0,02	0,01	13,42	1,47	203,05	60,23	0,02	0,01
Moderada	366,92	75,34	697,55	76,23	132,52	39,31	249,88	94,14
Alta	120,08	24,66	196,74	21,50	1,53	0,46	15,54	5,86
Muito alta	0,01	0,00	7,35	0,80	-	-	-	-

Fonte: Autora (2024).

Sanharó não teve ocorrências de áreas de alta e muito alta vulnerabilidade no IVSA, porém, para o IVSAT, aproximadamente 6% do município tem alta vulnerabilidade a inundações. A classe de muito alta vulnerabilidade não apareceu no índice socioambiental, já o

índice considerando os fatores tecnológicos indicou cerca de 1% de áreas com muito alta vulnerabilidade em Caruaru.

Para o IVSA (Figura 47), as áreas de vulnerabilidade estão mescladas em todo território, dificultando a identificação de concentração de áreas de mais vulnerabilidade. No IVSAT (Figura 48), com o surgimento de índices de valores mais altos, é possível identificar as regiões mais vulneráveis em Caruaru, Bezerros e Escada.

Os valores mais altos se encontram principalmente nos municípios de Escada e Caruaru, isso revela que as variáveis tecnológicas, tiveram grande relevância, pois as áreas que tiveram aumento de vulnerabilidade são principalmente as que apresentavam a pior situação nas variáveis de trechos inundáveis e as distâncias de estradas, hospitais e escolas.

O Índice de Moran Global foi aplicado para os indicadores de vulnerabilidade social, ambiental, tecnológico, e para o IVSA e IVSAT, com objetivo de testar a hipótese de independência espacial. Se a hipótese fosse válida, o valor do índice seria zero, indicando a aleatoriedade dos valores. Os índices globais tiveram valores muito próximos de 1, o valor positivo indica correlação espacial positiva, ou seja, uma concentração de valores elevados de vulnerabilidade (Lopes; Pereira, 2022).

Além disso, o Índice de Moran pode indicar se a correlação espacial é significativa, classificando as áreas em diferentes níveis de confiança. Isso é feito por meio dos valores *p* (*p-value*) obtidos. Neste estudo de caso todos os valores foram muito baixos (0.001 ou 0.01), confirmam que a significância estatística desses resultados é de 99% e 99,9%, permitindo-nos rejeitar a hipótese de ausência de autocorrelação espacial.

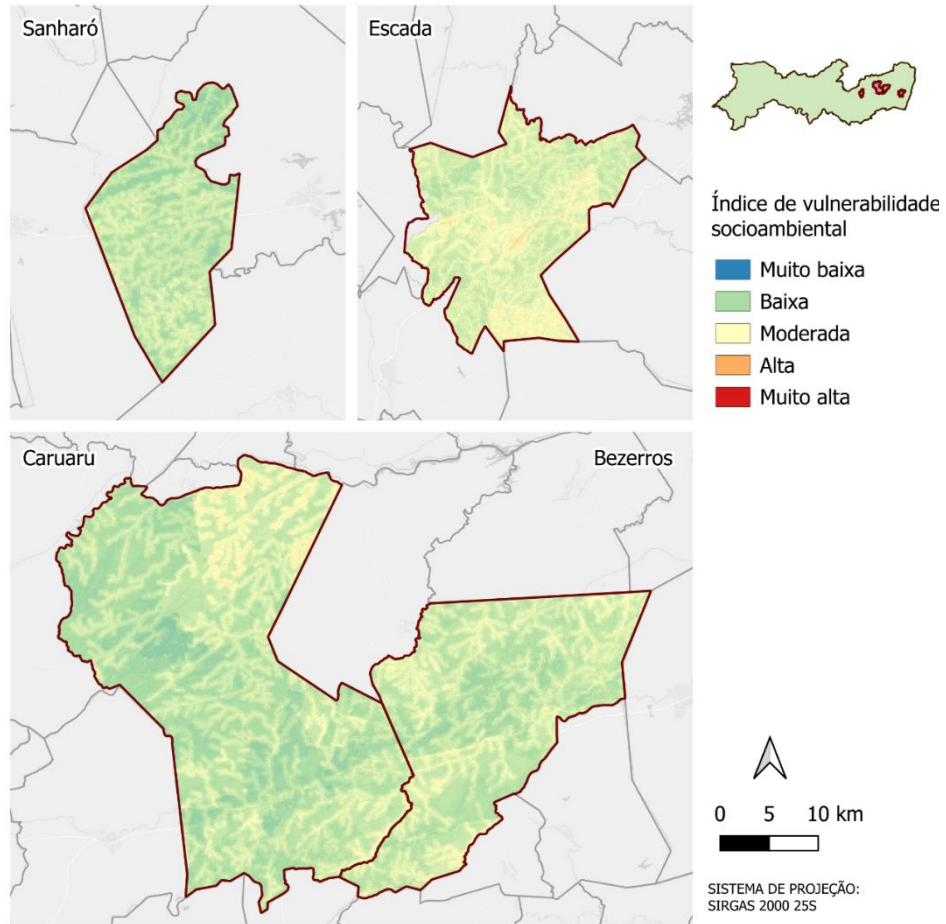
Além de mostrarem a forte autocorrelação espacial positiva em todos os índices de vulnerabilidade, os resultados do Índice de Moran (Tabela 3), também reforçam o padrão espacial clusterizado, ou seja, há forte dependência dos dados de vulnerabilidade. Isto sugere que áreas com altos valores de vulnerabilidade tendem a estar próximas de outras áreas com altos valores, e áreas com baixos valores de vulnerabilidade estão próximas de outras áreas com baixos valores.

Tabela 3 – Resultado Índice de Moran Global.

Índice de Moran	Social	Ambiental	Tecnológico	IVSA	IVSAT
Valor do índice	0,980694	0,842407	0,845883	0,878932	0,855062
p-Value	0,001	0,001	0,001	0,01	0,001
Padrão espacial	Clustered	Clustered	Clustered	Clustered	Clustered

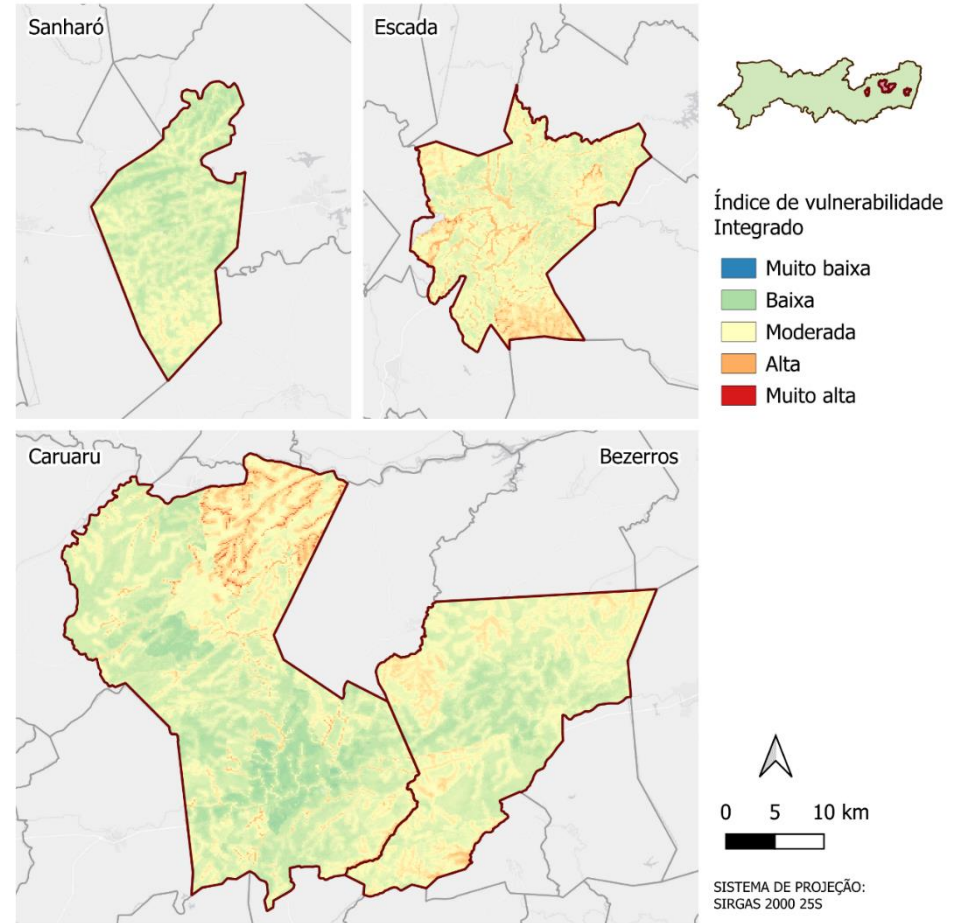
Fonte: Autora (2024).

Figura 47 – Índice de vulnerabilidade socioambiental.



Fonte: Autora (2024).

Figura 48 - Índice de vulnerabilidade integrado.



Fonte: Autora (2024).

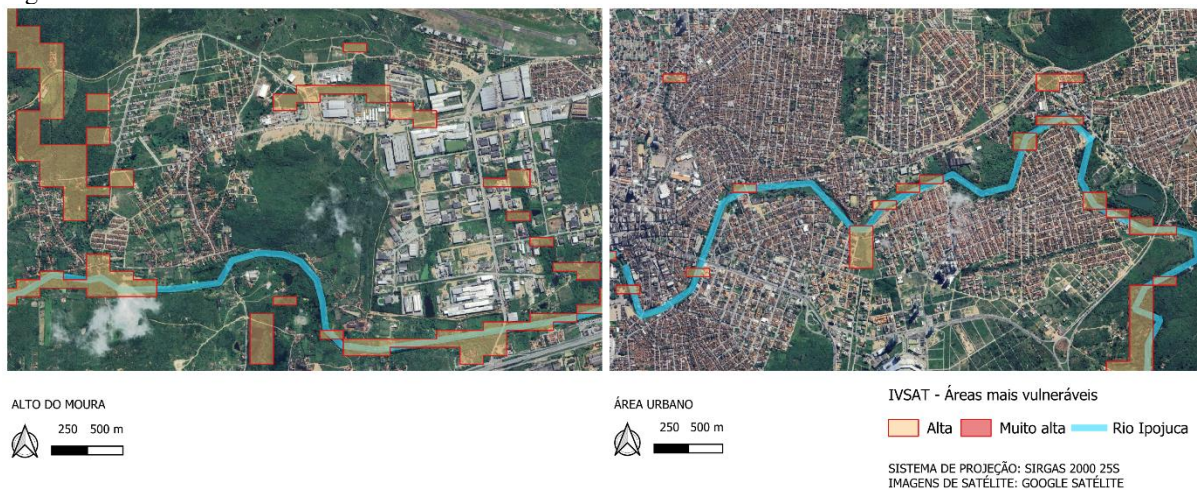
A identificação do padrão de agrupamento espacial tem implicações relevantes para tomada de decisão com relação à destinação de recursos e elaboração de estratégias para mitigar a vulnerabilidade (Leta; Adugna, 2023). Dessa forma, a identificação de áreas com altos índices de vulnerabilidade pode ajudar na tomada de decisão para diminuir as ocorrências e minimizar os impactos das inundações. Assim como a análise de áreas com baixos índices de vulnerabilidade podem trazer uma reflexão sobre que ações ou infraestruturas positivas a área possui, a fim de replicar em outros locais.

As áreas de índices de alta e muito alta vulnerabilidade foram analisadas com imagens de satélites, o que possibilitou uma visão detalhada da situação atual dessas regiões. A análise revelou que, para os quatro municípios, as áreas classificadas como mais vulneráveis estão predominantes localizadas em zonas rurais e pouco povoadas, que são áreas que não possuem infraestrutura.

A análise das imagens também permitiu identificar áreas de alta vulnerabilidade em meio urbano, ou com densidade de moradia maior, em Caruaru e Escada. Apesar destas áreas aparecerem em menor número e menores porções do território, sua identificação é de grande importância, pois representam áreas pontuais, onde intervenções no sentido de diminuir sua vulnerabilidade, podem ser muito eficientes.

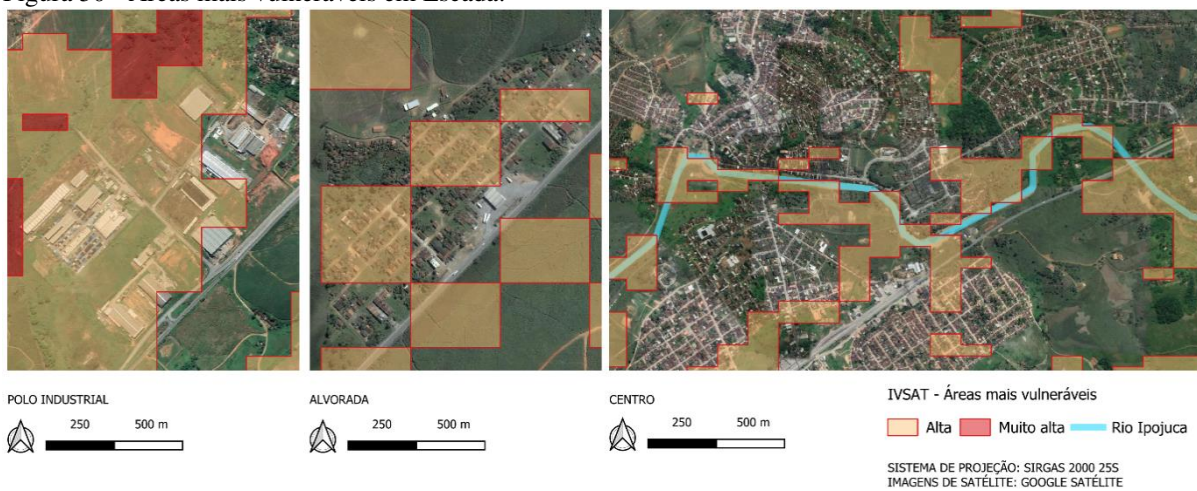
Para Caruaru, as áreas críticas distribuídas na área urbanas estão no Alto do Moura e em bairros próximos como Rendeiras, Salgado, Indianópolis, Cedro, Riachão e Dep. José Antônio Liberato (Figura 49). Em Escada, as áreas críticas estão no polo industrial, no bairro de alvorada e no centro no entorno do Rio Ipojuca (Figura 50). São áreas densamente edificadas e abrigam importantes construções como indústrias, centros educacionais e equipamentos culturais.

Figura 49 - Áreas mais vulneráveis em Caruaru.



Fonte: Autora (2024).

Figura 50 - Áreas mais vulneráveis em Escada.



Fonte: Autora (2024).

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os desastres relacionados com inundações podem ser reduzidos pela capacidade de identificar, medir e avaliar as diferentes vulnerabilidades. E ainda que os trabalhos apontem uma incipiência de estruturas adequadas para avaliação da vulnerabilidade, considerando fatores tecnológicos, existem diversos trabalhos que podem ser usados para estruturação e análise da eficiência dos modelos.

A revisão destes trabalhos possibilitou a identificação de variáveis sociais, ambientais e tecnológicas para analisar a vulnerabilidade socioambiental às inundações e a relação entre a presença de infraestruturas com a vulnerabilidade. A inclusão dos fatores tecnológicos permite uma análise abrangente que pode não só identificar áreas que precisam de maiores ou mais urgentes intervenções, como também que possuem medidas de mitigação da vulnerabilidade que podem ser replicadas.

A comparação do IVSA e do IVSAT demonstrou que os fatores tecnológicos têm impacto mensurável no aumento ou redução da vulnerabilidade, sugerindo que investimentos em tecnologias, seja estrutural ou não estrutural, são cruciais para aumentar a resiliência das comunidades. O índice de Moran evidenciou esta análise, apontando forte autocorrelação espacial positiva e indicando os padrões clusterizados de vulnerabilidade.

A vulnerabilidade nos municípios da pesquisa é influenciada por fatores socioeconômicos e tecnológicos, e fortemente relacionada com seu entorno. Esse padrão espacial sugere que intervenções direcionadas podem ser mais eficazes do que abordagens generalizadas. Essa análise pode orientar ações e políticas de planejamento urbano, visando diminuir a vulnerabilidade de áreas com relação a inundações.

Com base nos resultados, recomenda-se a priorização de medidas envolvendo fatores tecnológicos para mitigar a vulnerabilidade. Isto pode ser feito utilizando, desde campanhas de educação e conscientização, mapeamentos de risco, monitoramento de rios e chuvas, sistemas de alerta, a infraestrutura de drenagem, transportes, saneamento e moradias, visando preparar a população para o enfrentamento do desastre.

Em síntese, a pesquisa destaca a importância de uma abordagem multifatorial na avaliação da vulnerabilidade às inundações, evidenciando que a consideração de fatores tecnológicos é vital para uma avaliação mais precisa e para a implementação de políticas e práticas eficazes que possam reduzir a vulnerabilidade e aumentar a resiliência dos municípios.

No entanto, é importante considerar as limitações encontradas no estudo. Uma delas é a precisão a atualização dos dados utilizados, já que até a sua conclusão ainda não havia sido

divulgado o novo censo do IBGE e os dados sociais utilizados são do censo anterior, do ano de 2010. Além disso, os dados ambientais e tecnológicos são encontrados em diferentes fontes e escalas, muitas vezes necessitando de ajustes e manipulações que podem refletir na sua precisão.

Apesar das variáveis passarem por processos de normalização, para que estejam na mesma ordem de grandeza, o cálculo dos indicadores considerou todas as variáveis com pesos iguais, o que pode limitar a captura da complexidade de como esses fatores contribuem para vulnerabilidade. Contudo, estas limitações apontam para possíveis desdobramentos futuros deste tema.

Vale ressaltar que os indicadores e índices de vulnerabilidade não constituem medidas definitivas e exatas da vulnerabilidade, eles são influenciados pela disponibilidade, qualidade e escolha das variáveis, porém podem ser replicados para diferentes locais e ajudar a qualificar áreas mais vulneráveis em relação a áreas menos vulneráveis dentro do próprio município.

Para o futuro, recomenda-se focar no aprimoramento dos indicadores, incorporando novas variáveis, sobretudo tecnológicos, e dados recentes. Dentre as variáveis que podem ser incluídas, cita-se dados de acesso à informação, como aparelhos celulares e acesso à internet, existência de sistemas de monitoramento e alarme, e ações estruturais de prevenção.

Além disso, trazer a análise para diferentes escalas espaciais, como bairros ou comunidades, pode revelar vulnerabilidades específicas, permitindo intervenções mais direcionadas. A inclusão de um recorte temporal também pode fornecer uma visão mais dinâmica, de como a vulnerabilidade evolui ao longo do tempo, à medida que ocorrem mudanças ambientais ou urbanas, principalmente considerando eventos extremos que já ocorreram.

Finalmente, a integração dos índices de vulnerabilidade com políticas públicas de planejamento urbano, gestão de riscos e infraestrutura poderia ser explorada em estudos futuros, visando a mitigação eficaz dos impactos das inundações e o fortalecimento da resiliência das comunidades.

REFERÊNCIAS

- ADELEYE, B. *et al.* Poor development control as flood vulnerability factor in Suleja, Nigeria. **Town and Regional Planning**, v. 74, p. 23-35. 12 jun. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas de Vulnerabilidade a inundações**. Brasília: ANA, 2014.
- AHLBORG, H. *et al.* Bringing Technology into Social-Ecological Systems Research – Motivations for a Socio-Technical-Ecological Systems Approach. **Sustainability**, v. 11, n. 7. 4 abr. 2019.
- AKTAR, A. *et al.* Flood Vulnerability Assessment by Flood Vulnerability Index (FVI) Method: A study on Sirajganj Sadar Upazila. **International Journal of Disaster Risk Management**, v. 3, n. 1, p. 1-13. 2021.
- ANDRADE, M. M. N. de; SZLAFSZTEIN, C. F. Vulnerability assessment including tangible and intangible components in the index composition: An Amazon case study of flooding and flash flooding. **Science of the Total Environment**, v. 630, p. 903-912, 2018.
- APAC - Agência Pernambucana de Águas e Climas. **Bacias Hidrográficas – Rio Ipojuca**. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/bacias-hidrograficas-rio-ipojuca/165-baciashidrograficas-rio-ipojuca/196-bacia-do-rio-ipojuca>.
- AZIZI, E. *et al.* Spatial distribution of flood vulnerability index in Ardabil province, Iran. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**. 2022.
- BANCO MUNDIAL. **Relatório de Danos Materiais e Prejuízos Decorrentes de Desastres Naturais no Brasil (1995-2019)**. 2 ed.– Florianópolis: FAPEU, 2020.
- BARROS, M. V. F.; C. MENDES, P. H. M. de CASTRO. Vulnerabilidade socioambiental a inundação na área urbana de Londrina – PR. **Confins**, Revista Franco-Brasileira de Geografia. N. 24. 2015.
- BEGG, S. S.; N'YEURT, A. de R.; LESE, V. Integrated flood vulnerability assessment of villages in the Waimanu River Catchment in the South Pacific: the case of Viti Levu, Fiji. **Regional Environmental Change**. p. 83. 2021
- BIXLER, P. R. *et al.* An Observatory Framework for Metropolitan Change: Understanding Urban Social-Ecological-Technical Systems in Texas and beyond. **Sustainability**, v. 11, n. 13. 1 jul. 2019.
- BOMTEMPO FILHO, E. B. **Análise da vulnerabilidade a desastres naturais no município de Olinda – PE**. Dissertação (mestrado em Geociências). Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017
- BRASIL. MDR - Ministério do Desenvolvimento Regional. Portal de Dados Abertos do MDR. **Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID) - Dados Informados**. Disponível em: https://dadosabertos.mdr.gov.br/dataset/s2id_sedec. Acesso em: 09 de set. de 2024.
- BUFFON, E. A. M.; GOUDARD, G.; MENDONÇA, F. de A. Gestão de Risco de Desastres e Medidas de Adaptação em Áreas de Inundação Urbana em Pinhais, Paraná – Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 69/4, p. 635-646. Abr. 2017.
- CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. 2a ed. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2014, 302p.

CHANG, H. *et al.* Assessment of urban vulnerability using the socio-ecological-technological systems framework in six US cities. **Sustainable Cities and Society**, n. 68. fev. 2021a.

CHANG, H. *et al.* **Understanding Urban Flood Resilience in the Anthropocene: A Social-Ecological-Technological Systems (SETS) Learning Framework**. Annals of the American Association of Geographers. P. 837-857. 2021b

CHO, S. Y.; CHANG, H. Recent research approaches to urban flood vulnerability, 2006 – 2016. **Natural Hazard**, SS (1), p. 633-649. 13 abr. 2017.

CONDEPE/FIDEM. **Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca**. Série Bacias Hidrográficas de Pernambuco n°. 1. Recife, 2005.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Diagnóstico do município de Bezerros, estado de Pernambuco**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

_____. **Diagnóstico do município de Caruaru, estado de Pernambuco**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

_____. **Diagnóstico do município de Escada, estado de Pernambuco**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

_____. **Diagnóstico do município de Sanharó, estado de Pernambuco**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

FERRAZ, G. de F. **Simulação hidrológica e hidrodinâmica do impacto de enchentes na bacia do rio Sirinhaém e avaliação de sistema de controle proposto**. 2019. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

FRAGOSO, M. de L. de C.; SILVA, T. A. A. da. Desastre, risco e vulnerabilidade urbana: Uma análise a partir das enchentes e inundações no município de Escada/PE. **Revista Cadernos de Ciências Sociais**, Recife. Vol. 1, n. 14, p. 36 – 53, jan./jun. 2019.

FREIRE, N. C. F.; BONFIM, C. V. do; NATENZON, C. E. Vulnerabilidade socioambiental, inundações e repercussões na Saúde em regiões periféricas: o caso de Alagoas, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 19, n. 9, p. 3755-3762. 2014.

GOMES, A. I. da S. **Gestão ambiental e impactos de inundações: Um estudo no município de Catende-PE**. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

GRABOWSKI, Z. J. *et al.* Infrastructures as Socio-Eco-Technical Systems: Five considerations for interdisciplinary dialogue. **J. Infrastruct. Syst.**, v. 23, n. 4. 2017.

GUIMARÃES, R. M. *et al.* Construção e validação de um índice de vulnerabilidade socioambiental para a vigilância e gestão de desastres naturais no Estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 19, n. 10, p. 4157-4165. 2014.

HAMIDI, A. R. *et al.* Flood vulnerability assessment using MOVE framework: a case study of the northern part of district Peshawar, Pakistan. **Natural Hazards**, v. 101, n. 2, p. 385-408. 14 fev. 2020.

HAMSTEAD, Z. A; SAUER, J. Mapping Vulnerability to Weather Extremes: Heat and Flood Assessment Approaches. In: HAMSTEAD, Z. A. *et al.*, eds., **Resilient Urban Futures**. Springer. 2021.

HINKEL, J. *et al.* A diagnostic procedure for applying the social-ecological systems framework in diverse cases. **Ecology and Society**, v. 20, n. 1. 2015.

HOANG, V.D.; TRAN, H.T.; GUYEN, T.T. A GIS-based spatial multi-criteria approach for flash flood risk assessment in the Ngan Sau-Ngan Pho Mountainous River Basin, North Central of Vietnam. *Environ. Nat. Resour. J.* 2020;18(X):xx-xx.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

_____. **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Danos Sociais e Econômicos decorrentes de desastres naturais em consequência de fenômenos meteorológicos no Brasil: 2010 – 2019**. 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability**. World Health Organization (WHO), 2007.

_____. **Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability**. World Health Organization (WHO), 2022.

KIM, Y. *et al.* Socio, Ecological, and Technological Strategies for Climate Adaptation. In: HAMSTEAD, Z. A. *et al.*, eds., **Resilient Urban Futures**. Springer. 2021.

LACERDA, F. F. *et al.* Alterações climáticas globais; Uma realidade em Pernambuco. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônoma**. V. 11/12, p. 121 – 154. 2014/2015.

LEE, J. S., CHOI, H. I. Influence of construction schemes for a non-compensatory composite indicator on flood vulnerability assessment in the Korean Peninsula. **International Journal of Civil Engineering**. 2018.

LETA, B. M., ADUGNA, D. Charactering the level of urban flood vulnerability using the social-ecological-technological systems framework, the case of Adama city, Ethiopia. **Heliyon**. v. 9. 2023.

LOPES, P. C. B., PEREIRA, L. A. G. Análise espacial do índice de vulnerabilidade social nas novas divisões regionais do estado de Minas Gerais – Brasil. **Ateliê Geográfico**. v. 16. n. 3, p. 173 – 191. 2022.

MARKOLF *et al.* Interdependent infrastructure as linked social, ecological, and technological systems (SETs) to address lock-in and enhance resilience. **Earth's Future**, v. 6, n. 12, p. 1638–1659. 10 dez. 2018.

MEDEIROS, R. M. de. **Oscilações das temperaturas média do ar na Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca - PE, Brasil**. Revista de Geografia, vol. 38, n. 3. p. 117. 2021.

NASIRI *et al.* District flood vulnerability index: Urban decision-making tool. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, n. 5, p. 2249–2258. 14 mai. 2018.

NILSSON, A. E.; AVANGO, D.; ROSQVIST, G. Social-ecological-technological systems consequences of mining: Na analytical framework for more holistic impact assessments. *The Extractive Industries and Society*. n. 8: 101011, 2021.

OECD – ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Meeting of the Environment Policy Committee (Epoc) at ministerial level**. Paris: OECD, 2016.

OUMA, Y.; TATEISHI, R. Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: Methodological overview and case study assessment. **Water**, v. 6, n. 6, p. 1515–1545. 2014.

PATHAN, A. I. *et al.* AHP and TOPSIS based flood risk assessment – a case of the Navsari City, Gujarat, India. **Environ. Monit. Assess.** v. 194, p. 509. 2022.

PEREIRA, V. H. C. *et al.* Análise de dependência espacial da taxa de mortalidade por Covid-19 nos municípios brasileiros. **Confinis**, Revista Franco-Brasileira de geografia. n. 52, 2021.

PERNAMBUCO. **Plano Estadual de Recursos Hídricos: Resumo Executivo**. Recife, 2022.

_____. **Plano Hidroambiental da bacia hidrográfica do Rio Ipojuca – Tomo V**. Projetos Técnicos. Recife, 2010.

RAMOS FILHO, R. da S. Cenários de projeção do risco a inundações no Estado da Paraíba. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. 127 f. Campina Grande, 2022.

SALAMI, R. O; VON MEDING, J. K; GIGGINS, H. Urban settlements' vulnerability to flood risks in African cities: a conceptual framework. **Jàmbá – Journal of Disaster Risk Stud**, v. 9, n. 1, p. 1–9. 27 fev. 2017.

SANTOS, K. R. dos. Inundações urbanas: Um passeio pela literatura. **Rev. Geo. UEG**, v. 1, n. 1, p. 177-190. jan/jun, 2012.

SAUER, J. *et al.* Relating social, ecological, and technological vulnerability to future flood exposure at two spatial scales in four U.S. cities. **Sustainable Cities and Society**. v. 99. 2023.

SETTI, R. F. **Gestão de Riscos de Enchentes: Medidas não convencionais em drenagem urbana**. Dissertação (Mestrado em Defesa e Segurança Civil), 43 f. Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2016.

SILVA, B. de M. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica para avaliação de inundações na zona urbana de Caruaru, PE**. 2019. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

SILVA, J. P. da. Comunicação na gestão de projetos: o caso da construção da Adutora do agreste na cidade de Sanharó - PE. Monografia (Trabalho de conclusão do curso de administração). 87 f. Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, 2014.

SILVA, L. de O.; BARBOSA, K. V. Análise espacial da suscetibilidade a inundações na sub-bacia Muriaé 2, Campos dos Goytacazes (RJ). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**. Vol. 9, n. 8, p. 127 – 138. nov. 2018.

TASANTAB, J. C. Beyond the plan: How land use control practices influence flood risk in Sekondi-Takoradi. **Jàmbá – Journal of Disaster Risk Studies**. v. 11, n. 1. 2019.

TURNER, *et al.* A framework for vulnerability analysis in sustainability science. **Proc Natl Acad Sci USA** 100:8074–8079, 2003.

VASCONCELOS, A. C. F. de. **Indicadores de Vulnerabilidade Socioambiental: Proposição de framework e aplicação na cidade Natal - RN**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente. 127 f. Natal, 2019.

WESSLINK, A; FRITSCH, O; PAAVOLA, J. Earth system governance for transformation towards sustainable deltas: What does research into socio-eco-technological systems tell us? **Earth System Governance**, v. 4. 13 jul. 2020.