



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA**

TAYLINE EMANUELE CARRITILHA RIBEIRO DA COSTA

**AVALIAÇÃO DE IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS EM FUNÇÃO DO
RISCO DE INUNDAÇÃO**

Orientadora: Prof. Tati de Almeida

Co-orientador: Fabien Durand (IRD)

Dissertação de Mestrado em Geociências Aplicadas Publicação nº 243

BRASÍLIA

2025

TAYLINE EMANUELE CARRITILHA RIBEIRO DA COSTA

**AVALIAÇÃO DE IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS EM FUNÇÃO DO
RISCO DE INUNDAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências como requisito para o título de grau de Mestre em Geociências Aplicadas e Geodinâmica.

Orientadora: Prof. Dra. Tati de Almeida.

Co-orientador: Fabien Durand (IRD)

Ficha catalográfica elaborada automaticamente, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Emanuele Carrilha Ribeiro da Costa, Tayline
AVALIAÇÃO DE IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS EM FUNÇÃO DO
RISCO DE INUNDAÇÃO / Tayline Emanuele Carrilha
Ribeiro da Costa; orientador Tati de Almeida; co-
orientador Fabien Durand. Brasília, 2025.71 p.

Dissertação(Mestrado em Geociências Aplicadas)
Universidade de Brasília, 2025.

1. Estuário Amazônico. 2. Análise multicritério. 3.
Inundação. 4. Vulnerabilidade. I. de Almeida, Tati ,
orient.

**AVALIAÇÃO DE IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS EM FUNÇÃO DO
RISCO DE INUNDAÇÃO**

TAYLINE EMANUELE CARRITILHA RIBEIRO DA COSTA

Orientadora: Prof. Dra. Tati de Almeida

Co-orientador: Fabien Durand (IRD)

Banca Examinadora:

Presidente: Prof. Dr. Tati de Almeida (UnB/IG)

Membro Interno: Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista (UNB/IG)

Membro Externo: Prof.Dra. Tatiana Sussel Gonçalves Mendes (FCT/UNESP)

BRASÍLIA

2025

*Á minha família,
Ao meu pai, por todo apoio, amor, força e inspiração.
Á minha mãe e irmã por todo companheirismo e afeto.
Á Deus e a minha espiritualidade,
Que independente dos momentos, me guiaram.*

AGRADECIMENTOS

Início estes agradecimentos primeiramente à Deus, por me fortificar e me proporcionar a vida. De maneira afetuosa agradeço à minha família que sempre me deu apoio e incentivo para seguir minha trajetória e pode voar, alcançando meus sonhos. Agradeço especialmente ao meu pai Admilson, que mesmo sem poder ver tudo o que construí, me apoia com suas palavras e acalento. Agradeço a minha mãe Cristiane que me acompanha em todas as jornadas com muito amor e incentivo. E a minha querida irmã Maria Júlia que esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

As minhas orientadoras Tati de Almeida e Rejane Ennes que apesar de todos as dificuldades e situações adversas, não desistiram de mim e nem de me orientar por onde seguir, tais souberam ter muita paciência e cuidado desde que cheguei até hoje. Ao Fabien Durand, por toda paciência enquanto estava no Brasil para me orientar e ensinar, e mesmo de longe não deixou de demonstrar apoio e orientação. Se não fosse o apoio desses, essa construção e pesquisa não seria possível.

Agradeço a todos os professores que tive a oportunidade de conhecer e aprender dentro do PPGGAG (Henrique Llacer Roig; Alice César Fassoni de Andrade e Marcelo Henrique Leão Santos). Especialmente aos professores Edson Eyji Sano e Júlia Barbosa Curto Ma que participaram do meu processo inicial de avaliação da tese e que trouxeram muitas contribuições. Também deixo meu agradecimento ao professor Henrique Llacer Roig, pelos momentos de conversa sobre a tese, que me permitiram ter maior clareza no tema. Também agradeço aos amigos do PPGGAG, em especial aqueles com quem convivi em muitos momentos: Alisson, Lucas, Drielly, Eduarda, Bruna e Sara. Sou grata pela companhia e pelas várias risadas!

Aos técnicos do Laboratório de Sensoriamento Remoto 1, Sergião e Leandro que sempre foram gentis, eficientes e pacientes.

Aos meus queridos amigos, Lívia, Júlia Freire e Maria Vera pelo companheirismo, pelos momentos que me aguentaram com meus desabafos, pelos momentos de descontração e por me lembrarem de onde vim e para onde seguir.

Ao Programa de Pós Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica UNB (PPGGAG/UNB) pela infraestrutura e oportunidades.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001 (88887.642819/2021-00).

Saibam da minha gratidão gigante pelo apoio de todos!

“Recria tua vida, sempre, sempre.”

— Cora Coralina.

RESUMO

A presente dissertação promove uma análise dos riscos a inundações e vulnerabilidade ambiental, econômica e social em municípios do estado do Amapá, com ênfase em Macapá, Santana (municípios da Região da Metropolitana de Macapá – RMM), e Itaubal. A intensificação das inundações nos últimos anos tem sido impulsionada por fatores como as mudanças climáticas, a influência das marés oceânicas e problemas no avanço da ocupação urbana. Esse contexto incentivou o desenvolvimento de uma abordagem integrada de análise, que considera fatores físicos, sociais e ambientais presentes na área de estudo.

O estudo adotou como base o modelo hidrodinâmico SCHISM para simular manchas de inundações com base em cotas (percentil 99,5%) referentes ao nível da água médio, considerando dados do período de 2014 a 2017. Na produção da estimativa da vulnerabilidade socioambiental, foi utilizada a técnica de Análise Hierárquica de Processos (AHP), incorporando critérios físicos e socioeconômicos, tais como declividade do terreno, distância ao leito fluvial, densidade de drenagem, precipitação pluviométrica, renda per capita, taxa de analfabetismo, ausência de registro civil e cobertura dos serviços de coleta de lixo.

Os dados foram processados no Sistema de Informação Geográfica (SIG), com resolução espacial de 30 metros, permitindo uma análise espacial detalhada. Os resultados apontam que o município de Santana apresenta os maiores níveis de vulnerabilidade, especialmente nas áreas adjacentes ao Porto de Santana, onde há sobreposição entre elevada densidade populacional, baixa capacidade adaptativa e alta suscetibilidade física à inundações. Em Macapá, os bairros periféricos e as zonas de ressaca também demonstraram alto risco, enquanto Itaubal, por sua menor densidade urbana, apresentou risco mais localizado, concentrado em áreas de várzea. A integração dos dados permitiu a geração de mapas de risco úteis para o planejamento territorial, gestão de desastres e formulação de políticas públicas voltadas à redução da vulnerabilidade na Amazônia estuarina.

Palavras-chave: Estuário Amazônico; Análise multicritério; Inundações; Vulnerabilidade.

ABSTRACT

This dissertation analyzes flood risks and environmental, economic, and social vulnerability in municipalities in the state of Amapá, with a focus in Macapá, Santana, and Itaubal. The intensification of flooding in recent years has been driven by factors such as climate change, the influence of ocean tides, and challenges related to urban expansion. This context motivated the development of an integrated analytical approach that considers the physical, social, and environmental factors present in the study area.

The study employed the SCHISM hydrodynamic model to simulate flood-prone areas based on mean water level elevations (99.5th percentile), using data from 2014 to 2017. To estimate socio-environmental vulnerability, the Hierarchical Process Analysis (HPA) technique was applied, incorporating physical and socioeconomic criteria such as terrain slope, distance from the riverbed, drainage density, rainfall, per capita income, illiteracy rate, lack of civil registration, and access to waste collection services.

The data were processed using Geographic Information Systems (GIS) with a spatial resolution of 30 meters, allowing for detailed spatial analysis. The results indicate that the municipality of Santana exhibits the highest levels of vulnerability, especially in the areas adjacent to the Port of Santana, where high population density, low adaptive capacity, and high physical susceptibility to flooding converge. In Macapá, peripheral neighborhoods and backwater zones also showed high risk, while in Itaubal, due to its lower urban density, the risk was more localized, concentrated in floodplain areas. Data integration enabled the generation of risk maps useful for territorial planning, disaster management, and the formulation of public policies aimed at reducing vulnerability in the estuarine Amazon.

Keywords: Amazon Estuary. Multicriteria analysis. Flooding. Vulnerability.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AHP	Análise Hierárquica de Processos (<i>Analytic Hierarchy Process</i>)
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CAFe CAPES/MEC	Comunidade Acadêmica Federada
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CR	Índice de Consistência da AHP (<i>Consistency Ratio</i>)
DEM	Modelo Digital de Elevação (<i>Digital Elevation Model</i>)
EGM08	Modelo Geoidal Global de 2008 (<i>Earth Gravitational Model 2008</i>)
ESA	Agência Espacial Europeia (<i>European Space Agency</i>)
Fig.	Figura
GIS / SIG	Sistema de Informação Geográfica (<i>Geographic Information System</i>)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEPA	Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital do Terreno
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)
PNDC	Política Nacional de Defesa Civil
RMM	Região Metropolitana de Macapá
RSL / SLR	Revisão Sistemática da Literatura (<i>Systematic Literature Review</i>)
SCHISM	Sistema Integrado de Hidrociência em Escalas Cruzadas Semi-implícito (<i>Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System</i>)
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SR	Sensoriamento Remoto
Tab.	Tabela
TRMM	Missão de Medição de Chuvas Tropicais (<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>)
VOSviewer	Software para visualização e análise bibliométrica

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2 - MAPA DE CO-OCORRÊNCIA DE PALAVRAS-CHAVE DESENVOLVIDO NO SOFTWARE VOSVIEWER. FONTE: AUTORA (2025).	18
FIGURA 3 - MAPA DA REGIÃO METROPOLITANA DE MACAPÁ (RMM), DESTACANDO ÁREAS COM ALTA FREQUÊNCIA DE INUNDAÇÃO	22
FIGURA 4 - MODELO HIDRODINÂMICO CROSS-SACLE DE ALTO DESEMPENHO. FONTE: FASSONI-ANDRADE ET AL.,2023	25
FIGURA 5 - COMPILADO DE REPORTAGENS SOBRE AS INUNDAÇÕES EM MACAPÁ, ITAUBAL E SANTANA DE 2015 A 2025. FONTES: DIÁRIO DO AMAPÁ, 2015; GOVERNO DO AMAPÁ, 2016; G1 AP- MACAPÁ, 2018; PREFEITURA DE MACAPÁ, 2024; GLOBOPLAY, 2025 E G1 AP - MACAPÁ, 2025.	30
FIGURA 7 - DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES ANUAIS MÁXIMOS DE NÍVEL D'ÁGUA (PERCENTIL 99,5%) PARA O PERÍODO 2014–2017, UTILIZADOS PARA DEFINIÇÃO DA COTA DE REFERÊNCIA DE INUNDAÇÃO.	46
FIGURA 8 - MANCHA DE INUNDAÇÃO GERADA A PARTIR DA APLICAÇÃO DA COTA DE REFERÊNCIA DE 3,83 M SOBRE O MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE COPERNICUS, 30 M DE RESOLUÇÃO), REPRESENTANDO AS ÁREAS SUSCETÍVEIS À INUNDAÇÃO EXTREMA NA REGIÃO METROPOLITANA DE MACAPÁ E NO MUNICÍPIO DE ITAUBAL.	47
FIGURA 9- RESULTADO DA AHP APLICADA ÀS VARIÁVEIS FÍSICAS (ESCALA 1 A 5) DA REGIÃO METROPOLITANA DE MACAPÁ; EM B, APRESENTA-SE O HISTOGRAMA ESTATÍSTICO DA DISTRIBUIÇÃO DA AHP PARA AS ÁREAS URBANAS DA REGIÃO DE ESTUDO (IBGE, 2018).	50
FIGURA 10 - RESULTADO DA AHP APLICADA ÀS VARIÁVEIS SOCIAIS (ESCALA 1 A 5) NOS SETORES CENSITÁRIOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE MACAPÁ; EM B, APRESENTA-SE O HISTOGRAMA ESTATÍSTICO DA DISTRIBUIÇÃO DA AHP PARA AS ÁREAS URBANAS DA REGIÃO DE ESTUDO (IBGE, 2018).	51
FIGURA 11 - RESULTADO DA AHP INTEGRADA (VARIÁVEIS FÍSICAS E SOCIAIS) NOS SETORES CENSITÁRIOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE MACAPÁ, EM ESCALA DE 1 A 5. EM A, OBSERVA-SE A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL; EM B, APRESENTA-SE O HISTOGRAMA ESTATÍSTICO DA DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DA AHP INTEGRADA PARA AS ÁREAS URBANAS DA REGIÃO DE ESTUDO (IBGE, 2018).	52
FIGURA 12 - MAPA DE RISCO DE INUNDAÇÃO RESULTANTE DA SOBREPOSIÇÃO DAS MANCHAS DE INUNDAÇÃO SIMULADAS (COTA DE REFERÊNCIA 3,83 M) COM O ÍNDICE DE VULNERABILIDADE INTEGRADA OBTIDO PELA AHP. A INTEGRAÇÃO EVIDENCIA AS ÁREAS DE MAIOR RISCO NA REGIÃO METROPOLITANA DE MACAPÁ, DESTACANDO SETORES URBANOS EM QUE A SUSCETIBILIDADE FÍSICA À INUNDAÇÃO SE SOBREPÕE ÀS FRAGILIDADES SOCIOECONÔMICAS	54

FIGURA 13 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA PORCENTAGEM DE ÁREA EXPOSTA EM CADA SETOR CENSITÁRIO DA REGIÃO METROPOLITANA DE MACAPÁ, OBTIDA A PARTIR DA SOBREPOSIÇÃO DA MÁSCARA BINÁRIA DE VULNERABILIDADE MÉDIA A ALTA COM OS POLÍGONOS SETORIAIS E PORCENTAGEM DE ÁREA EXPOSTA E O NÚMERO DE MORADORES RESIDENTES POR SETOR CENSITÁRIO. 56

LISTA DE TABELAS

ATABELA 1 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO AHP EM ESTUDOS DE VULNERABILIDADE E RISCO DE INUNDAÇÕES	24
TABELA 2 - DADOS UTILIZADOS NA ANÁLISE MULTICRITÉRIO E DE EXPOSIÇÃO AO RISCO.	34
TABELA 3 - CRITÉRIOS AMBIENTAIS UTILIZADOS NA ANÁLISE MULTICRITÉRIO DE SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÕES. INTERVALOS RECLASSIFICADOS EM CINCO CATEGORIAS DE VULNERABILIDADE	37
TABELA 4 - CRITÉRIOS SOCIAIS UTILIZADOS NA ANÁLISE MULTICRITÉRIO DE SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÕES. INTERVALOS RECLASSIFICADOS EM CINCO CATEGORIAS DE VULNERABILIDADE.	40
TABELA 5 - ANÁLISE DAS METODOLOGIAS E PESO AHP UTILIZADOS EM ARTIGOS INTERNACIONAIS. FONTE: AUTORA (2024)	42
TABELA 6 - PESOS GLOBAIS (GBL PRIO.) ATRIBUÍDOS ÀS VARIÁVEIS NA ANÁLISE MULTICRITÉRIO AHP	49

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivo.....	16
CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE.....	17
2.1 Análise bibliométrica: construção do referencial teórico	17
2.2. Inundações e riscos hidrológicos em áreas estuarinas amazônicas.....	20
2.3 Vulnerabilidade socioespacial e análise multicritério	22
2.4. Modelagem hidrodinâmica em regiões tropicais	24
2.5. Integração entre modelagem, análise multicritério e mapeamento de risco	26
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 Área de Estudo	29
3.2 Procedimentos Metodológicos	30
3.3 Estimativa e simulação de áreas suscetíveis à inundação	32
3.4 Estimativa da vulnerabilidade à inundação com base na análise multicritério (AHP)	34
3.4.1. Dados e Pré-processamento das Variáveis	34
3.4.2 Análise Multicritério (AHP).....	41
3.4.3. Integração dos Dados e Geração do Mapa de Risco.....	43
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS.....	46
4.1 Validação das Simulações de áreas de inundação	46
4.2 Análise Multicritério (AHP).....	48
4.3. Geração do Mapa de Vulnerabilidade	51
4.4 Sobreposição das Manchas e da Vulnerabilidade: Mapa de Risco	54
5. DISCUSSÃO.....	57
5. CONCLUSÃO.....	60
6. BIBLIOGRAFIA.....	63
APÊNDICE A: Resultados Consolidados da Consulta aos Especialistas.....	72

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A Bacia Amazônica, maior sistema hidrográfico do planeta, abrange cerca de 6 milhões de km² e compreende uma vasta rede de lagos, rios, pântanos e planícies de inundação que sustentam dinâmicas ecológicas fundamentais e formas de vida tradicionais (Sippel et al., 1992). As planícies de inundação, em particular, têm papel estratégico na manutenção do equilíbrio ambiental, influenciando os fluxos de carbono, nutrientes e sedimentos em escalas locais e globais (Junk et al., 2012; Melack et al., 2009). Esses sistemas naturais são, também, fonte de recursos essenciais para populações ribeirinhas e indígenas, desempenhando uma função socioeconômica crítica.

Contudo, o funcionamento equilibrado desses ecossistemas tem sido ameaçado pelas transformações provocadas pelas mudanças climáticas. De acordo com Salati (2001), essas transformações podem ser analisadas em três dimensões: variações climáticas globais de origem natural; alterações regionais derivadas de atividades humanas, como as mudanças no uso do solo; e transformações globais antrópicas, principalmente associadas à emissão de gases de efeito estufa. O último relatório do IPCC (2022) aponta que essas mudanças tendem a intensificar a frequência e a severidade de eventos extremos, como secas, inundações, elevação do nível do mar e ondas de calor, afetando especialmente as populações mais vulneráveis.

Nesse cenário, o estuário amazônico se configura como uma das regiões mais sensíveis a tais impactos, dada a interação entre regimes fluviais e marinhos. A Região Metropolitana de Macapá (RMM) (Figura 1), que compreende os municípios de Macapá e Santana (Porto de Santana) e o município de Itaubal, exemplifica essa condição crítica. A área é marcada por ocupações humanas em zonas alagáveis e infraestrutura urbana limitada, tornando-se particularmente vulnerável a inundações. Em anos recentes, eventos hidrológicos extremos têm causado impactos significativos, demandando decretações frequentes de situação de emergência, tanto em nível municipal quanto estadual (GOVERNO DO AMAPÁ, 2016; G1 AP, 2025). As inundações afetam diretamente comunidades urbanas e rurais, provocando desde deslocamentos forçados até a disseminação de doenças associadas à contaminação da água (UFSC, 2012).

Diante dessa realidade, torna-se evidente a necessidade de desenvolver diagnósticos que integrem dimensões ambientais, físicas e sociais na avaliação do risco dessas comunidades. O conceito de risco adotado aqui considera sua formação a partir da interação entre a ameaça (ocorrência de inundações), a exposição (presença de elementos

vulneráveis em áreas de risco) e a vulnerabilidade (capacidade de resposta e adaptação dos grupos sociais afetados), conforme proposto por Cardona (2004) e Castro (2007). A vulnerabilidade, nesse contexto, está relacionada a fatores como renda, acesso a serviços básicos, grau de escolaridade e precariedade habitacional, compondo um quadro de desigualdades estruturais que se agravam frente à intensificação dos eventos extremos (Chambers, 1989; PNDC, 2007).

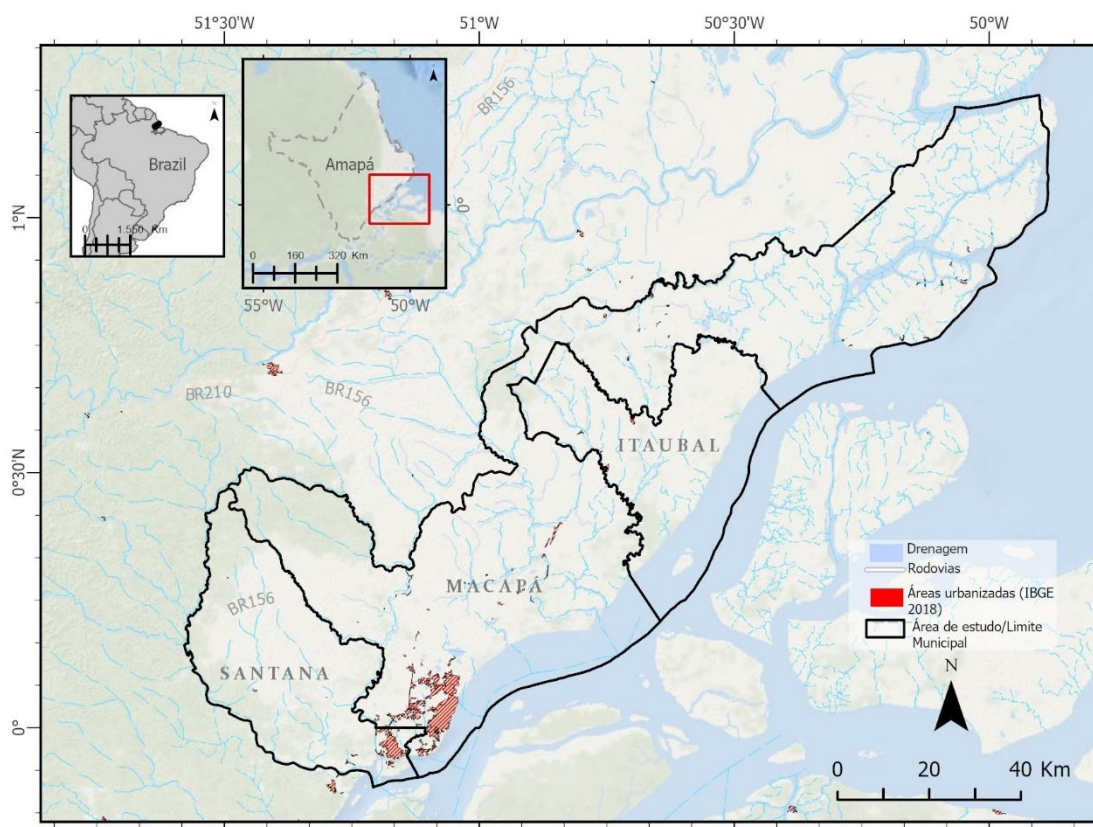


Figura 1 - Mapa de localização área de estudo. Fonte Autora (2025).

A gestão de riscos e desastres, portanto, exige instrumentos capazes de antecipar e mitigar os efeitos desses eventos sobre a população e o território. Isso implica incorporar abordagens integradas ao planejamento urbano e ambiental, capazes de mapear áreas críticas e orientar ações de prevenção. Iniciativas como o Caderno Técnico GIRD+10 (2021) reforçam a importância da articulação entre instituições públicas e comunidades locais na construção de estratégias de resiliência frente às ameaças hidrometeorológicas.

Nesse sentido, esta pesquisa se justifica pela ausência de diagnósticos integrados voltados ao estuário amazônico que combinem modelagem hidrodinâmica validada com análise espacial da vulnerabilidade socioambiental. Embora estudos anteriores, como os de Fassoni-Andrade et al. (2021, 2023) e Mansur et al. (2016), tenham fornecido

importantes bases de dados e metodologias para a região, ainda são escassas as abordagens que integrem dados censitários, simulações de alta resolução e análise multicritério voltadas à produção de mapas de risco.

A proposta deste trabalho, portanto, é suprir essa lacuna por meio da análise espacial estruturada no tripé conceitual composto por perigo de inundação, exposição e vulnerabilidade. Serão utilizadas manchas de inundação simuladas por meio das cotas obtidas pelo modelo *Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System* - SCHISM, validadas com dados *in situ*, e posteriormente sobrepostas aos municípios de Santana, Macapá, Itaubal no Amapá. As variáveis de avaliação utilizadas consideram indicadores físicos e sociais processados via utilização da análise multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Espera-se indicar áreas de risco a inundação e gerar subsídios técnicos para fortalecer a capacidade de resposta, orientar o planejamento territorial e contribuir com políticas públicas de prevenção a desastres no contexto da Amazônia estuarina.

1.1 Objetivo

Esta pesquisa tem como objetivo geral analisar a exposição ao risco e a vulnerabilidade física e social de populações localizadas no estuário amazônico, com foco nos municípios de Macapá, Santana (Porto de Santana) e Itaubal, todos inseridos na Região Metropolitana de Macapá (RMM).

Para isso, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

1. Determinar região que pode sofrer com inundação em zonas urbanas e rurais dos três municípios, a partir das cotas geradas pelo modelo hidrodinâmico SCHISM (*Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System*);
2. Aplicar o método de Análise Hierárquica de Processos (AHP) para estimar e mapear a vulnerabilidade da população frente às inundações, com base em indicadores físicos e sociais;
3. Sobrepor as zonas de perigo (manchas) de inundação e de vulnerabilidade para identificar as áreas e populações mais vulneráveis nos três municípios analisados.

CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE

2.1 Análise bibliométrica: construção do referencial teórico

A construção de um referencial teórico sólido e alinhado aos objetivos desta pesquisa exigiu uma abordagem sistemática de revisão da literatura. Para isso, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), apoiada por uma análise bibliométrica, com o objetivo de identificar autores, abordagens e metodologias relevantes sobre risco de inundação, vulnerabilidade socioambiental e análise espacial.

A busca foi conduzida na base de dados *Web of Science*, utilizando as palavras-chave “*floods*” and “*risk*” and “*remote sensing*” and “*urban*” (figura 2), resultando em mais de 100 artigos científicos. Os dados foram processados no software START para triagem, e no *VOSviewer* para geração de mapas de coocorrência (figura 2) e agrupamentos temáticos. Como resultado, foram identificados quatro grandes núcleos conceituais recorrentes na literatura:

1. Estimativas e métodos probabilísticos para mapeamento de áreas de risco (*cluster* amarelo);
2. Construção de mapas de risco com SIG e sensoriamento remoto (*cluster* verde);
3. Parâmetros físicos e hidrológicos como clima, simulações e impactos (*cluster* azul);
4. Métodos de avaliação integrados a fatores socioambientais (*cluster* vermelho), com destaque para a predominância de pesquisas desenvolvidas na China.

de séries temporais robustas, à baixa resolução de alguns dados geoespaciais e à escassez de informações socioeconômicas atualizadas, o que contribui para ampliar as incertezas nas simulações. Zhang et al. (2018) reforçam que a vulnerabilidade a inundações é o resultado direto da combinação entre exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação, destacando a importância de análises espaciais integradas.

A literatura também aponta a análise multicritério como uma abordagem consolidada para avaliação de vulnerabilidade, especialmente em contextos com múltiplos fatores e dados incertos. A técnica AHP tem sido amplamente utilizada para atribuição de pesos e ordenamento de critérios, como demonstrado por Pham et al. (2021) e Kazakis et al. (2015). Para estes autores, o método permite uma estrutura decisória mais transparente e replicável, contribuindo para a produção de diagnósticos robustos e aplicáveis à gestão de riscos.

A análise dos mapas de coocorrência gerados no *VOSviewer* (Figura 2) confirmou essa tendência, ao evidenciar que a produção científica sobre inundações está organizada em torno da integração entre abordagens estatísticas, geoespaciais e multicritério, apontando para a necessidade de soluções metodológicas interdisciplinares.

Com base na revisão sistemática da literatura, foi possível organizar os principais aportes teóricos e metodológicos desta dissertação em quatro eixos temáticos centrais. O primeiro trata das inundações e dos riscos hidrológicos em regiões estuarinas amazônicas, reunindo estudos que analisam os padrões de alagamento, a influência das marés e os impactos desses eventos em áreas urbanas vulneráveis. O segundo eixo aborda a vulnerabilidade socioespacial e a análise de risco, com ênfase em abordagens que integram variáveis sociais, econômicas e físicas na compreensão dos fatores que estruturam o risco. O terceiro se refere à modelagem hidrodinâmica em regiões tropicais, especialmente no uso do modelo *SCHISM* e seus desafios de aplicação em ambientes fluvio-marinhos de baixa declividade. Por fim, o quarto eixo contempla a integração entre modelagem, análise multicritério e mapeamento de risco, reunindo experiências nacionais e internacionais que aplicaram abordagens integradas para estimar, espacializar e comunicar a vulnerabilidade frente às inundações.

A busca inicial não utilizou palavras diretamente relacionadas à Amazônia, pois o objetivo era identificar estudos voltados à temática de risco de inundação e vulnerabilidade socioambiental de forma ampla, contudo dentre os artigos surgiram temáticas voltadas a Amazônia. A separação dos artigos foi feita posteriormente, com base na análise de relevância dos resultados obtidos e na triagem por meio do software

START (State of the Art through Systematic Review), considerando critérios como área de estudo, abordagem metodológica e aderência aos objetivos da pesquisa. Assim, apenas os trabalhos que apresentavam relação direta com contextos amazônicos ou estuarinos foram selecionados para compor o referencial teórico.

Para a definição das variáveis consideradas na análise multicritério, foi realizada uma revisão bibliográfica inicial, abrangendo estudos nacionais e internacionais sobre vulnerabilidade e suscetibilidade a inundações. Essa revisão permitiu identificar os principais fatores físicos, hidrológicos e socioambientais relevantes ao contexto da área de estudo. A atribuição dos pesos relativos entre as variáveis foi conduzida por meio de consulta a especialistas, utilizando o método Analytic Hierarchy Process (AHP), de forma a incorporar o conhecimento técnico e a experiência profissional no processo de ponderação dos critérios.

Cada um desses eixos será aprofundado nos itens a seguir, com base em autores e estudos representativos da literatura nacional e internacional.

2.2. Inundações e riscos hidrológicos em áreas estuarinas amazônicas

A intensificação dos eventos de inundação em regiões estuarinas tropicais tem sido amplamente registrada por estudos recentes, que apontam para a combinação entre mudanças climáticas, elevação do nível do mar, variações hidrológicas extremas e ocupações humanas em áreas vulneráveis como os principais fatores de agravamento do risco (Ward et al., 2013; IPCC, 2022; ANA, 2020). Esse processo se manifesta com particular severidade na Amazônia atlântica, onde o estuário do rio Amazonas reúne características naturais e antrópicas que ampliam a exposição da população aos impactos de eventos hidrometeorológicos extremos.

Segundo Barichivich et al. (2018), a intensificação recente das cheias na Amazônia está relacionada ao fortalecimento da circulação de Walker, fenômeno climático que altera os padrões de precipitação e resulta em elevações atípicas do nível dos rios. No estuário amazônico, esse comportamento é agravado pela influência oceânica, especialmente em períodos de maré alta combinada com cheia fluvial. A baixa declividade do terreno e a predominância de áreas de várzea ou ressaca tornam os centros urbanos próximos ao delta altamente suscetíveis à inundação (Mansur et al., 2016).

O município de Macapá e sua região metropolitana ilustram esse cenário. A expansão urbana em direção às margens de canais e áreas alagáveis, muitas vezes desprovida de infraestrutura de drenagem, tem exposto populações de baixa renda a

sucessivos eventos de alagamento. O Atlas de Vulnerabilidade às Inundações da Amazônia Legal (ANA, 2020, figura 3) identifica Macapá como um dos núcleos urbanos com maior recorrência de registros de emergência por inundação entre 2000 e 2018. As consequências desses eventos vão desde perdas materiais e deslocamentos forçados até a disseminação de doenças de veiculação hídrica, como apontado por estudos aplicados ao contexto urbano amazônico (UFSC, 2012; GOVERNO DO AMAPÁ, 2016).

Na mesma linha, Almeida et al. (2016) destacam que os altos carregamentos de sedimentos e a configuração hidromorfológica da planície de inundação amazônica são determinantes para a expansão da lâmina d'água durante os períodos de cheia, afetando diretamente a vegetação e os padrões de uso e ocupação do solo. Best (2019), por sua vez, observa que grandes rios tropicais, como o Amazonas, estão entre os mais impactados por pressões antrópicas contemporâneas, o que amplia sua instabilidade frente a extremos hidrológicos.

Apesar do avanço das pesquisas sobre processos hidrológicos e impactos das inundações na Amazônia, ainda são escassos os estudos que integram de forma sistemática dados de modelagem hidrodinâmica com informações socioespaciais para a geração de mapas de risco. A presente pesquisa busca contribuir nesse sentido, ao propor uma abordagem metodológica combinada, que leva em conta a dinâmica física do estuário, os padrões de vulnerabilidade social e a espacialização da exposição ao risco em municípios localizados na foz do Amazonas.

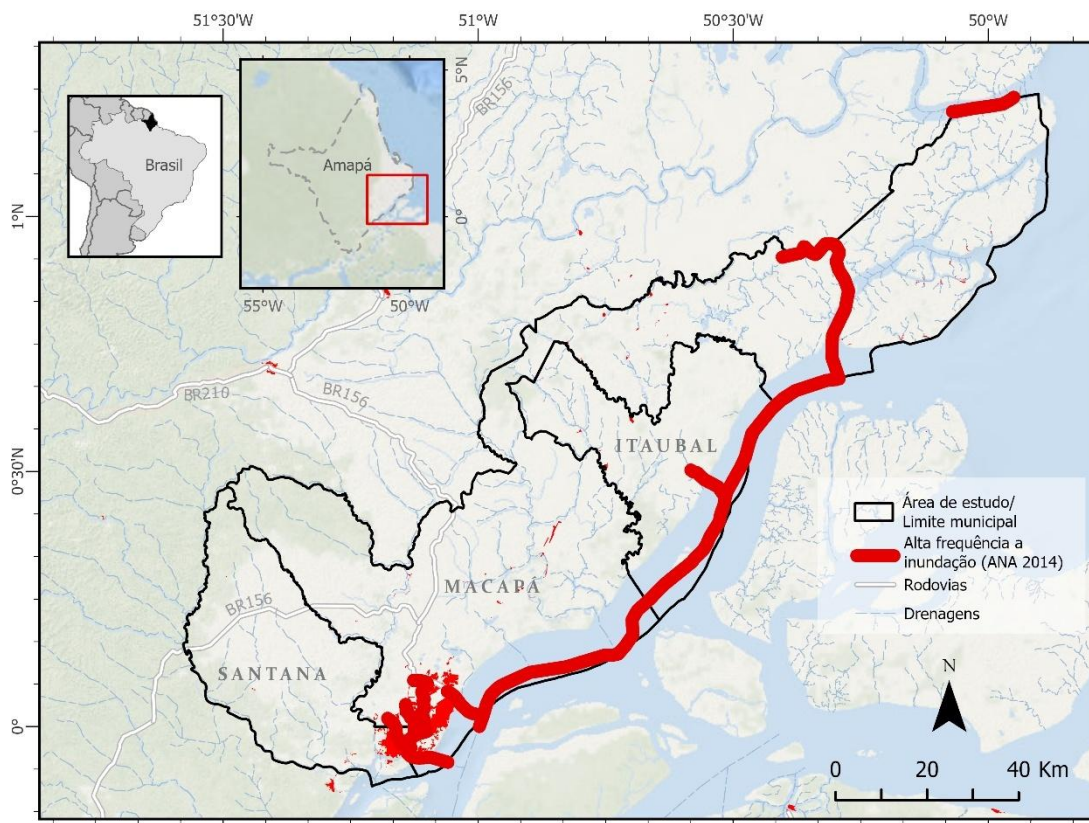


Figura 3 - Mapa da Região Metropolitana de Macapá (RMM), destacando áreas com alta frequência de inundação. Fonte: ANA, 2020.

2.3 Vulnerabilidade socioespacial e análise multicritério

O conceito de vulnerabilidade consolidou-se como eixo central nas discussões sobre risco socioambiental, sendo compreendido como condição multifatorial derivada da interação entre exposição a ameaças, fragilidades socioeconômicas e capacidade adaptativa (Adger, 2006; Cutter et al., 2003). Em contextos amazônicos, a vulnerabilidade socioespacial manifesta-se de forma aguda em áreas de ressaca, várzeas e periferias urbanas, onde a recorrência de inundações é potencializada por deficiências estruturais, urbanização desordenada e desigualdades históricas.

Chambers (1989) definiu vulnerabilidade como a suscetibilidade de um grupo social ao dano diante de perturbações externas, conceito ampliado por Cardona (2004), que a inseriu no marco teórico do risco como função da interação entre ameaça, vulnerabilidade e exposição. No Brasil, a Política Nacional de Defesa Civil (PNDC, 2007) incorporou esse entendimento, reforçando a importância do mapeamento de áreas suscetíveis como base para a prevenção e o planejamento territorial.

Estudos aplicados à Amazônia destacam que fatores como renda, escolaridade, densidade populacional, sub-registro civil e acesso precário a serviços básicos desempenham papel determinante na forma como os impactos de inundações se

distribuem (Mansur et al., 2016). No entanto, a tradução desses indicadores em ferramentas de diagnóstico espacial ainda constitui desafio metodológico relevante. Nesse contexto, a Análise Multicritério (AMC) tem se mostrado uma abordagem eficaz para integrar variáveis heterogêneas em avaliações de risco, possibilitando a identificação de áreas prioritárias para intervenção.

Entre os métodos de AMC, a AHP, desenvolvido por Saaty (1980), tem ganhado destaque por permitir atribuir pesos relativos a critérios distintos por meio de comparações paritárias, mesmo em condições de incerteza. Essa característica é especialmente relevante na Amazônia, onde a disponibilidade de dados é muitas vezes limitada ou heterogênea.

A literatura internacional já consolidou o AHP como método versátil, aplicável a contextos de áreas com potencial de inundação: desde regiões costeiras indianas (Muthusamy, 2019b) aplicando o método em regiões costeiras, integrando fatores como elevação, declividade, distância da costa e densidade populacional, demonstrando o potencial do AHP para representar de forma quantitativa a vulnerabilidade em áreas tropicais sujeitas a eventos extremos. Passando por áreas mediterrâneas (Kazakis et al., 2015) utilizaram a AHP para gerar um mapa de perigo de inundação a partir da integração de critérios físicos e ambientais, como declividade, uso e cobertura do solo, distância de rios, geologia e intensidade de chuva. No Sudeste Asiático (Dang & Kumar, 2017; Pham et al., 2021) utilizaram a AHP para identificar zonas de alta suscetibilidade, combinando parâmetros morfométricos, pluviais e de uso do solo em ambiente SIG, o que permitiu elaborar um diagnóstico espacial de risco com alto grau de precisão. No Brasil, Nobre et al. (2007) destacaram seu potencial no planejamento ambiental integrado.

Mais recentemente, novas aplicações ampliaram a discussão e demonstraram a atualidade do método. Pimenta et al. (2025) aplicaram o AHP na cidade de Ananindeua (PA), evidenciando que a precipitação e a declividade são fatores críticos na definição de zonas urbanas vulneráveis a inundações. Santana (2025) empregou o AHP na bacia do Rio Una (PA), consolidando sua aplicabilidade no contexto amazônico. Em Minas Gerais, Avelino (2024) comparou pesos definidos por especialistas e pesos gerados por técnicas estatísticas, concluindo que o julgamento de especialistas apresentou maior capacidade preditiva. Por sua vez, Quishpe et al. (2025) ampliaram a perspectiva amazônica ao avaliar riscos climáticos na Amazônia equatoriana, destacando a necessidade de metodologias multiescalares e integradas.

A Tabela 1 sintetiza exemplos de aplicação do AHP em estudos de vulnerabilidade e risco de inundações, evidenciando tanto sua versatilidade em contextos internacionais quanto a lacuna existente no caso amazônico brasileiro, reforçando a originalidade da presente dissertação.

Tabela 1 - Exemplos de aplicação do AHP em estudos de vulnerabilidade e risco de inundações

<i>Autor(es) / Ano</i>	<i>Local de Estudo</i>	<i>Objetivo da Aplicação</i>	<i>Principais Contribuições</i>
Kazakis et al. (2015)	Grécia (Região de Rhodope–Evros)	Mapear áreas suscetíveis a inundações	Integração de critérios físicos e sociais; aplicabilidade em escala regional.
Muthusamy (2019)	Tamil Nadu, Índia (zona costeira)	Avaliar vulnerabilidade costeira	Demonstrou aplicabilidade do AHP em áreas tropicais sujeitas a eventos extremos.
Dang & Kumar (2017)	Vietnã (bacia Vu Gia–Thu Bon)	Mapear suscetibilidade a inundações	Evidenciou a robustez do AHP em contextos com alta heterogeneidade ambiental.
Pham et al. (2021)	Sudeste Asiático	Avaliar risco em bacias hidrográficas	Integração com SIG, produzindo diagnósticos espaciais de alta resolução.
Nobre et al. (2007)	Brasil	Planejamento ambiental integrado	Pioneiro no uso do AHP para definir áreas prioritárias de intervenção.
Mansur et al. (2016)	Delta amazônico, Brasil	Analisar vulnerabilidade urbana	Destacou importância de variáveis sociais na distribuição desigual do risco.
Avelino (2024)	Nova Lima, MG (Brasil)	Comparar pesos subjetivos e objetivos	Modelo com especialistas obteve maior acurácia (CSI=94,7%).
Pimenta et al. (2025)	Ananindeua, PA (Amazônia urbana)	Mapear suscetibilidade a inundações	Precipitação e declividade como fatores críticos em áreas urbanas planas.
Santana (2025)	Bacia do Rio Una, PA	Mapear vulnerabilidade socioambiental	Consolida uso do AHP no contexto amazônico.
Quishpe et al. (2025)	Amazônia equatorial	Avaliar riscos climáticos integrados	Reforça necessidade de metodologias multiescalares e territoriais.

2.4. Modelagem hidrodinâmica em regiões tropicais

A modelagem hidrodinâmica tem sido amplamente empregada na previsão e análise de áreas suscetíveis à inundação, especialmente em regiões tropicais sujeitas à combinação de cheias fluviais, chuvas intensas e marés oceânicas. Em ambientes estuarinos, como a foz do rio Amazonas, essas interações geram sistemas altamente dinâmicos, cuja simulação requer modelos capazes de operar com malhas flexíveis, múltiplas escalas e variações topográficas complexas (Teng et al., 2017; Ward et al., 2013).

Dentre os modelos utilizados para representar esses ambientes complexos, o *SCHISM* (*Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System*) tem se destacado pela sua arquitetura numérica robusta e capacidade de lidar com diferentes escalas

espaciais e temporais. O SCHISM é um modelo hidrodinâmico de código aberto, baseado no sistema SELFE (Zhang & Baptista, 2008), que oferece simulação em duas ou três dimensões (2DH/3D) com uso de malhas não estruturadas, adaptáveis a regiões costeiras, estuarinas e fluviais com topografia irregular e geometrias complexas (Zhang et al., 2016). Sua abordagem semi-implícita permite simulações estáveis mesmo em condições de grande variação de profundidade e influência mista entre forçantes continentais e oceânicas.

Na literatura especializada, o modelo tem sido aplicado com sucesso em diferentes contextos. Fassoni-Andrade et al. (2021, figura 4) realizaram uma aplicação pioneira no estuário do rio Amazonas, estruturando uma base batimétrica detalhada a partir de cartas náuticas, altimetria SRTM e topografia de áreas de ressaca. Em continuidade, Fassoni-Andrade et al. (2023) utilizaram o *SCHISM* para representar a propagação sazonal das marés ao longo do canal principal, demonstrando como variações mínimas na amplitude podem induzir alagamentos em zonas urbanas ribeirinhas.

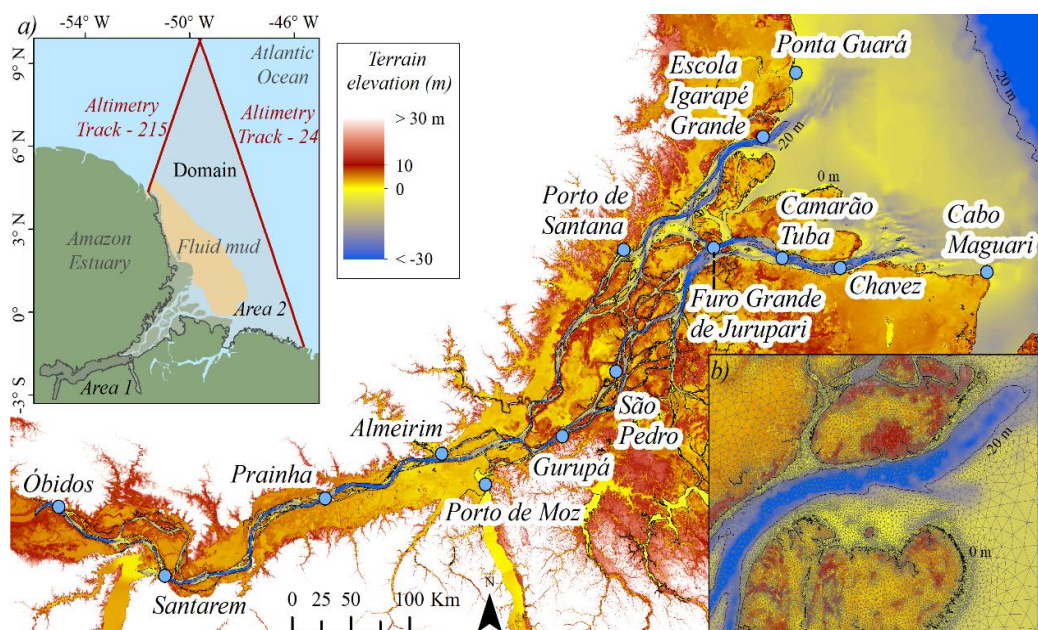


Figura 4 - Modelo hidrodinâmico cross-sacle de alto desempenho. Fonte: Fassoni-Andrade et al., 2023

Complementando esses trabalhos, Coulet et al. (2025) aplicaram o *SCHISM* com resolução espacial refinada para quantificar as contribuições relativas da maré oceânica, da descarga fluvial e da forçante atmosférica sobre os níveis máximos anuais da água (*TWLmax*) ao longo do estuário amazônico. Os resultados indicaram que a influência da maré decresce da foz (85%) para regiões a montante (44%), enquanto a descarga fluvial ganha importância no sentido inverso (de 9% a 41%). A ação do vento, embora

secundária, também mostrou contribuição entre 5% e 13%, especialmente nas proximidades da costa.

Em linha semelhante, Fassoni-Andrade (2023) utilizaram o mesmo modelo para investigar a variabilidade sazonal e interanual da maré na região estuarina do Amazonas. Os autores demonstraram que a interação entre a descarga do rio e a maré oceânica influencia significativamente tanto a amplitude quanto a fase das ondas de maré, sendo determinante para a ocorrência de inundações em áreas urbanas ribeirinhas.

Essas aplicações reforçam o papel do *SCHISM* como ferramenta robusta em ambientes tropicais de baixa declividade, com vantagens sobre modelos tradicionais como MIKE21 e Delft3D, especialmente em domínios com múltiplas interfaces fluviais e marinhas (Shao et al., 2020). O uso de malhas não estruturadas permite o refinamento localizado sem prejuízo do desempenho computacional, e os módulos integrados do modelo possibilitam ainda o acoplamento com simulações de transporte de sedimentos, qualidade da água e salinidade.

Ainda assim, a literatura aponta limitações persistentes. Almeida et al. (2016) e Tehrany et al. (2014) destacam os desafios impostos pela ausência de dados de entrada de alta resolução — como batimetria contínua, séries históricas de nível d'água e dados de descarga fluvial. Essa escassez exige soluções de integração de múltiplas fontes (como cartas náuticas, Modelo Digital de Elevação e levantamentos de campo), o que, embora viável, requer atenção especial à padronização espacial e temporal dos insumos.

Por fim, autores como Muthusamy (2019), Pham et al. (2021) e Kazakis et al. (2015) defendem que os resultados da modelagem hidrodinâmica devem ser articulados com indicadores de vulnerabilidade socioambiental em ambiente SIG, para produção de mapas de risco mais representativos da realidade territorial. Essa integração será abordada no próximo item desta revisão.

2.5. Integração entre modelagem, análise multicritério e mapeamento de risco

Nas últimas décadas, o avanço das geotecnologias e dos métodos quantitativos multicritério tem permitido abordagens mais integradas e robustas na avaliação do risco de inundações, especialmente em regiões onde coexistem vulnerabilidades socioambientais e elevada complexidade hidrodinâmica. A literatura recente tem apontado para a importância de articular simulações hidrodinâmicas com indicadores físicos, sociais e ambientais, a fim de produzir mapas de risco mais consistentes e úteis

para o planejamento territorial (Kazakis et al., 2015; Pham et al., 2021; Majeed et al., 2023).

Essa integração metodológica tem como premissa a utilização de produtos da modelagem física — como cotas de inundação, manchas de alagamento e curvas de permanência — como variáveis de entrada para sistemas de apoio à decisão espacial baseados em análise multicritério. A técnica do *Analytic Hierarchy Process* (AHP), em particular, tem se mostrado eficaz na ponderação de critérios heterogêneos, permitindo que dados provenientes da modelagem hidrodinâmica sejam combinados com informações de uso e cobertura do solo, densidade populacional, indicadores socioeconômicos e infraestrutura urbana (Tehrany et al., 2014; Muthusamy, 2019).

Essa abordagem integrada tem sido aplicada com sucesso em diferentes contextos geográficos. Por exemplo, Pham et al. (2021) utilizaram resultados de modelos hidráulicos para gerar mapas de suscetibilidade a inundações no Vietnã, integrando-os com dados topográficos, pluviométricos e demográficos em ambiente SIG. Da mesma forma, Majeed et al. (2023), ao aplicar a combinação de AHP e *Frequency Ratio*, demonstraram que o uso de critérios derivados de Modelos Digitais de Elevação (como declividade, distância ao rio e densidade de drenagem) junto com a modelagem do nível da água resulta em avaliações mais precisas do risco espacializado.

No contexto brasileiro, embora ainda pouco explorada, essa integração tem se mostrado promissora em estudos aplicados à Amazônia estuarina. Fassoni-Andrade et al. (2023), por exemplo, destacam que a combinação entre simulações hidrodinâmicas e dados socioeconômicos pode subsidiar diagnósticos mais completos das áreas suscetíveis a inundações. Coulet et al. (2025) e Fassoni-Andrade. (2023) reforçam esse entendimento ao mostrar que a modelagem precisa considerar as contribuições simultâneas de maré, descarga fluvial e vento, o que torna ainda mais relevante sua articulação com fatores de exposição social e infraestrutura urbana para fins de mapeamento de risco.

Além disso, a aplicação conjunta de modelagem e AHP tem sido valorizada pela sua capacidade de comunicar risco de forma espacializada e compreensível, contribuindo para processos participativos de gestão territorial. Como destaca Kazakis et al. (2015), a transparência na atribuição de pesos e critérios, somada à representatividade visual dos mapas gerados, favorece a adoção desses produtos por gestores públicos e tomadores de decisão.

Ainda que promissora, a literatura aponta desafios importantes nesse tipo de integração: a compatibilidade entre resoluções espaciais, o cuidado na reamostragem dos

dados e a manutenção da coerência conceitual entre as variáveis envolvidas (Tehrany et al., 2014). Outro aspecto crítico diz respeito à qualidade e atualização das bases socioeconômicas, que, quando defasadas ou agregadas em escalas muito amplas, podem comprometer a precisão do diagnóstico final.

Em síntese, a integração entre modelagem hidrodinâmica, análise multicritério e sistemas de informação geográfica representa uma abordagem metodológica potente para a avaliação de risco de inundações em contextos complexos como o da Amazônia estuarina. Essa articulação permite representar a realidade territorial em sua totalidade — incorporando tanto a dinâmica físico-hidrológica quanto os elementos sociais e espaciais que condicionam a vulnerabilidade. Essas experiências fundamentam a estratégia metodológica desta dissertação, que combina modelagem hidrodinâmica SCHISM com análise multicritério AHP para estimar a vulnerabilidade socioespacial na RMM de Macapá.”

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

A presente pesquisa teve como foco a RMM, no estado do Amapá, abrangendo os municípios de Macapá, Santana (com ênfase no Porto de Santana) e Itaubal. Esses territórios, situados no canal norte do rio Amazonas, compuseram um conjunto urbano-estuarino caracterizado por condições físicas e socioeconômicas que os tornavam altamente vulneráveis a eventos de inundação.

A delimitação da RMM foi estabelecida pela Lei Complementar Estadual nº 21, de 26 de fevereiro de 2003, incluindo os municípios de Macapá, Santana e Mazagão. Para os fins desta dissertação, contudo, o recorte espacial priorizou os dois primeiros e o acréscimo do município de Itaubal, em função da disponibilidade de dados e da relevância dos eventos hidrológicos recentes.

Macapá apresenta uma área territorial de 6.563,85 km², com população residente de 442.933 pessoas em 2022 e densidade demográfica de 67,48 hab/km² (IBGE, 2023). Santana apresenta uma área territorial de 1.541,22 km², com população residente de 107.618 habitantes em 2022 e densidade demográfica de 69,83 hab/km². Itaubal apresenta uma área territorial de 1.662,87 km², com população residente de 5.599 habitantes em 2022 e densidade demográfica de 3,45 hab/km², a menor entre os três municípios analisados.

Os três municípios compartilham características geográficas marcadas por baixa declividade, presença de áreas de várzea e intensa influência da maré, fatores que acentuam a suscetibilidade a alagamentos. O clima equatorial predomina, com chuvas concentradas entre janeiro e junho, ultrapassando 2.500 mm anuais. A combinação entre sazonalidade da chuva, regime de marés semidiurnas e descargas do rio Amazonas configurava um sistema hidrodinâmico de alta complexidade.

A vulnerabilidade social também pode ser destacada. Segundo levantamento do IBGE (2018) e do CEMADEN dado de população em áreas de risco no Brasil, mais de 20% da população de Santana residia em áreas classificadas como de risco para inundações. Em Macapá, as regiões periféricas foram recorrentemente afetadas por alagamentos, agravados pela ausência de drenagem urbana e pelo crescimento urbano desordenado. Em 2024 e 2025, eventos severos de inundação foram registrados na capital, motivando decretos de emergência e mobilização da Defesa Civil.

Diversas reportagens e boletins oficiais evidenciaram a frequência e severidade crescente desses eventos nos três municípios ao longo da última década (DIÁRIO DO

AMAPÁ, 2015; GOVERNO DO AMAPÁ, 2016; G1 AP, 2018; PREFEITURA DE MACAPÁ, 2024; GLOBOPLAY, 2025; figura 5). Esses documentos apontaram não apenas os impactos materiais das inundações, mas também a ausência de respostas estruturais efetivas. Tal contexto reforça a urgência de diagnósticos integrados e instrumentos de planejamento territorial voltados à gestão de risco.



Figura 5 - Compilado de reportagens sobre as Inundações em Macapá, Itaubal e Santana de 2015 a 2025. Fontes: DIÁRIO DO AMAPÁ, 2015; GOVERNO DO AMAPÁ, 2016; G1 AP- Macapá, 2018; PREFEITURA DE MACAPÁ, 2024; GLOBOPLAY, 2025 e G1 AP - Macapá, 2025.

Nesse sentido, a escolha da área de estudo (Figura 1) não decorreu apenas de critérios metodológicos, mas respondeu a uma urgência social e ambiental que exige intervenções fundamentadas em evidências científicas. Esta pesquisa buscou contribuir com esse esforço, por meio da integração entre modelagem hidrodinâmica, análise de decisão multicritério e dados socioambientais locais.

3.2 Procedimentos Metodológicos

A metodologia adotada estruturou-se a partir do objetivo geral da pesquisa, que consistiu em analisar a exposição ao risco e a vulnerabilidade ambiental, física e social de populações localizadas na RMM, com foco nos municípios de Macapá, Santana e Itaubal (figura 6).

A pesquisa foi articulada metodologicamente por meio de uma abordagem integrada, visando a estimativa das áreas de perigo à **inundação**, baseada em modelagem hidrodinâmica (SCHISM) delimitando as zonas a **exposição** física ao risco. Essas manchas de inundação, espacializadas a partir de cotas extremas (percentil 99,5%) e um MDE, serviram como base para avaliar a exposição socioambiental. Paralelamente, a

vulnerabilidade foi quantificada usando o método AHP, incorporando indicadores físicos (e.g., declividade, distância ao rio) e sociais (e.g., renda, alfabetização), cuja ponderação reflete desigualdades estruturais. A integração dos dados em ambiente em SIG, integrando as manchas de inundação simulada com os índices de vulnerabilidade física e social, permitiu mapear o risco como produto da intersecção entre ameaça natural, exposição humana e fragilidades socioeconômicas. Essa estrutura orientou a escolha dos métodos e a organização das etapas de análise.

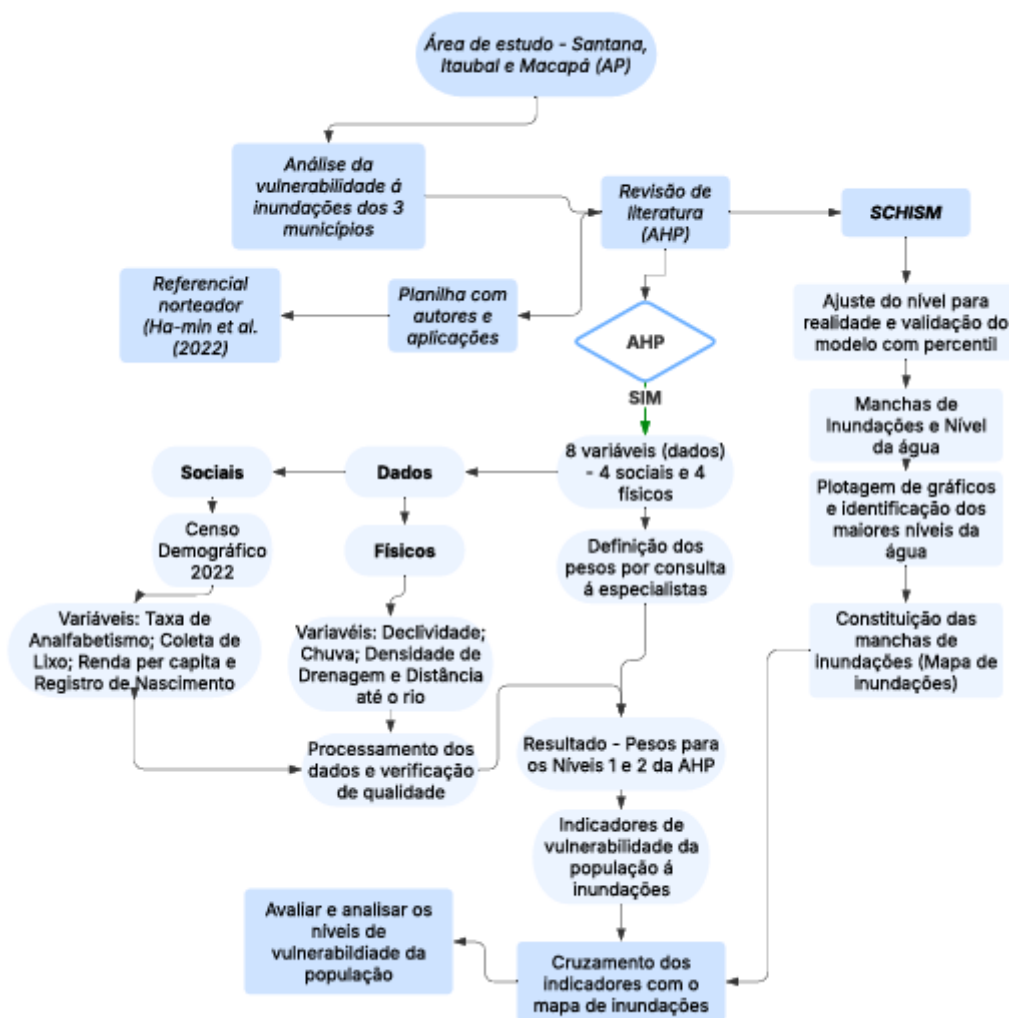


Figura 6 - Fluxograma de metodologias do trabalho. Fonte: Autora (2025).

A elaboração da matriz foi conduzida com suporte da plataforma *AHP Online System* (AHP-OS - <https://bpmsg.com/ahp/>), que operacionalizou os cálculos matemáticos de normalização, vetores de prioridade e verificação da razão de consistência. O processo de consulta aos especialistas, ao todo 20 de diferentes áreas do conhecimento como Geociências, Recursos Hídricos, Planejamento Urbano e Engenharia

Ambiental, incluindo geógrafos, geólogos, engenheiros civis e agrônomos, permitindo calibrar as comparações, regionalizando o julgamento de importância segundo o contexto amazônico e considerando a contribuição efetiva de cada variável na vulnerabilidade local, aspecto essencial quando aplicado a populações urbanas e ribeirinhas na Amazônia estuarina. Os resultados específicos da consulta estão no apêndice A.

Na etapa do preenchimento da matriz de comparação pareada (Níveis AHP) seguiu a estrutura hierárquica composta por três níveis. No nível 0 situou-se o objetivo geral da pesquisa, que corresponde à identificação da vulnerabilidade socioambiental à inundação na área de estudo. O nível 1 agregou os dois grandes grupos de variáveis — físico e social — enquanto o nível 2 concentrou os oito critérios específicos, sendo quatro físicos (declividade, densidade de drenagem, precipitação e distância ao rio) e quatro sociais (renda per capita, analfabetismo, ausência de registro civil e coleta de lixo). Essa estruturação hierárquica permitiu a organização das comparações de forma sistemática, conforme proposto na metodologia original do AHP (Saaty, 1980), e garantiu a consistência na distribuição dos pesos entre critérios interdependentes. A sobreposição foi executada em ambiente SIG (*ArcGIS Pro*), com todas as camadas já harmonizadas na mesma projeção (SIRGAS 200, UTM ZONA 23 N) e resolução espacial de 30 metros. A operação foi realizada sobre o recorte espacial correspondente aos municípios de Macapá, Santana e Itaubal.

3.3 Estimativa e simulação de áreas suscetíveis à inundação

A estimativa das áreas suscetíveis à inundação foi realizada a partir de simulações hidrodinâmicas com o modelo SCHISM (*Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System*), reconhecido por sua robustez na representação de ambientes estuarinos e costeiros complexos. O modelo foi aplicado na configuração 2DH, que permite capturar a dinâmica horizontal dos fluxos em regiões extensas e de baixa declividade, como o estuário do rio Amazonas.

A modelagem envolveu as etapas de calibração, validação e simulação, conforme descrito no trabalho de Fassoni-Andrade (2021;2023), utilizando dados do período de 2014 a 2017. As condições de contorno incluíram a maré oceânica, a vazão fluvial e a ação do vento, que foram incorporadas com base em registros observacionais e séries temporais confiáveis. A malha computacional foi construída a partir da integração de dados batimétricos provenientes de cartas náuticas da Marinha do Brasil, altimetria SRTM e levantamentos topográficos locais. Os dados de níveis de água simulados pelo

modelo SCHISM compreenderam séries temporais contínuas de cotas do nível da água (2014–2017), corrigidas em relação ao viés do modelo em +0,74 metros, obtidas com alta frequência temporal (intervalos de poucos minutos). O modelo SCHISM representa o nível d'água em relação ao nível médio do mar (Mean Sea Level – MSL) adotado internamente como referencial vertical. As observações de maré utilizadas para calibração e validação, por sua vez, estavam referidas ao datum vertical da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), correspondente ao nível médio do mar de Imbituba. Para compatibilizar ambos os referenciais verticais e permitir a comparação direta entre os resultados simulados e os dados observados, aplicou-se uma correção de viés de +0,74 m, de forma que as séries simuladas foram ajustadas ao mesmo referencial das observações.

Os dados de níveis de água simulados pelo modelo SCHISM compreenderam séries temporais contínuas de cotas do nível da água (2014–2017), corrigidas em relação ao viés do modelo em +0,74 metros, obtidas com alta frequência temporal (intervalos de poucos minutos). No modelo SCHISM, o referencial vertical adotado corresponde ao nível médio do mar (*Mean Sea Level* – MSL), utilizado internamente como nível de referência para as simulações hidrodinâmicas. As observações de maré utilizadas para calibração e validação, por sua vez, estavam referidas ao datum vertical da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), definido pelo nível médio do mar do marégrafo de Imbituba (SC), que constitui o referencial altimétrico oficial do Brasil. Dessa forma, para compatibilizar ambos os referenciais verticais e permitir a comparação direta entre os resultados simulados e os dados observados, foi aplicada uma correção de viés de +0,74 m, ajustando as séries simuladas ao mesmo datum das observações.

As séries foram organizadas por ano, contemplando valores médios diários e valores corrigidos, de forma a capturar com precisão a interação entre os regimes de maré e a variação das vazões do rio Amazonas.

As simulações produziram cotas hidrodinâmicas para diferentes cenários de cheia e maré alta. Para esta pesquisa, foi adotada a cota correspondente ao percentil 99,5% das simulações — um valor representativo de eventos extremos de inundação. Esse valor, estimado em 3,83 metros, foi validado com base em dados de marégrafos e campanhas de monitoramento realizadas no mesmo período (2014–2017). A opção pelo percentil elevado segue a abordagem de Lyddon et al. (2018) e Haigh et al. (2010), que

recomendam esse critério para a definição de limiares críticos em estudos de inundação em áreas costeiras e fluviais.

A partir dessa cota de referência, foi gerada a mancha de inundação, com base na interseção do modelo digital de elevação e os níveis d'água simulados. Essa mancha representa a zona com maior suscetibilidade a inundação em condições hidrodinâmicas extremas e foi integrada às análises multicritério para compor o mapa final de risco à inundação.

3.4 Estimativa da vulnerabilidade à inundação com base na análise multicritério (AHP)

3.4.1. Dados e Pré-processamento das Variáveis

Para a análise da vulnerabilidade socioambiental e da exposição ao risco de inundações, foram utilizados dados secundários de fontes públicas (IBGE, ANA/SNIRH, WorldClim, entre outras). Os dados foram organizados em dois grupos principais: físicos e sociais. A escolha dos indicadores (Modelo Digital de Elevação, Precipitação média anual, Densidade de drenagem, Distância até cursos d'água, Alfabetização, Renda domiciliar per capita, Registro civil e Coleta de lixo) considerou sua relevância para a caracterização de áreas sujeitas a inundações e a disponibilidade em escala compatível com o recorte espacial da pesquisa. As bases de dados utilizadas, suas respectivas fontes e escalas de trabalho estão sistematizadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados utilizados na análise multicritério e de exposição ao risco.

Variável	Tipo	Fonte	Formato	Resolução	Escala aproximada
Modelo Digital de Elevação	Físico	Copernicus (TanDEM-X)	GeoTIFF	30 m	1:100.000
Precipitação média anual	Físico	WorldClim v2	Raster (NetCDF)	~1 km (reamostrado)	1:5.000.000
Densidade de drenagem	Físico	ANA (rede hidrográfica)	Vetorial	30m	1:250.000
Áreas urbanizadas	Físico	IBGE	Vetorial	-	variável
Distância até cursos d'água	Físico	ANA (rede hidrográfica)	Raster (calculado)	30 m	1:250.000
Alfabetização	Social	Censo IBGE 2022 (setores)	Vetorial	Setores censitários	Variável
Renda domiciliar per capita	Social	Censo IBGE 2022 (setores)	Vetorial	Setores censitários	Variável
Registro civil	Social	Censo IBGE 2022 (setores)	Vetorial	Municipal	Variável
Coleta de lixo	Social	Censo IBGE 2022 (setores)	Vetorial	Setores censitários	Variável

Todos os dados foram reprojatados para UTM 23N SIRGAS 2000, rasterizados com célula de 30 metros, e reclassificados. A reclassificação dessas variáveis foi realizada de forma padronizada em cinco categorias, variando de muito baixa (classe 1) a muito alta vulnerabilidade (classe 5), permitindo sua integração no modelo multicritério. Os intervalos foram definidos a partir da combinação de três referenciais: (i) estatísticas descritivas da área de estudo (histogramas e valores mínimos/máximos observados); (ii) estudos hidrológicos e geomorfológicos realizados na Amazônia; e (iii) metodologias previamente consolidadas em análises multicritério de suscetibilidade a inundações.

Valores nulos ou ausentes foram tratados de forma criteriosa: quando representavam áreas sem dados válidos (por exemplo, zonas não habitadas ou sem cobertura de sensores), foram mantidos como “*NoData*” para evitar distorções na análise; quando a ausência de valores poderia comprometer a continuidade espacial, aplicou-se interpolação espacial baseada nos valores das células vizinhas mais próximas.

A variável **proximidade do rio**, derivada da Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO250), foi fundamentada em evidências de que áreas mais próximas às margens do rio apresentam maior exposição a transbordamentos e ressacas. Estudos realizados em diferentes contextos hidrológicos, tanto na Europa (Papaioannou et al., 2015) quanto em ambientes tropicais (Daneshparvar et al., 2022), confirmam que o perigo de inundação decresce de forma não linear com o afastamento das margens. No estuário amazônico, a dinâmica é potencializada pela conjugação de cheias sazonais e marés, como demonstrado por Fassoni-Andrade et al. (2023). Por esse motivo, foram definidas faixas mais estreitas (100–250 metros), onde a suscetibilidade é mais elevada, e intervalos mais amplos em áreas distantes, refletindo o gradiente de perigo observado em campo e reportado na literatura (Mansur et al., 2016).

A **densidade de drenagem**, derivada da Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO250), foi utilizada como indicador da dissecação do relevo e do potencial de escoamento superficial. Valores muito baixos ($\leq 0,30$ km/km²) são característicos de planícies amazônicas extensas e altamente permeáveis, como ressaltam estudos clássicos de morfometria que associam baixa densidade a terrenos planos e solos mais permeáveis. Em contrapartida, valores superiores a 2,20 km/km², embora menos comuns em terrenos de baixa declividade, foram incluídos como limite superior para comparabilidade inter-regional, alinhando-se a trabalhos recentes que relacionam maior densidade de drenagem a resposta hidrológica mais rápida e a maior potencialidade de escoamento superficial (Pimenta et al., 2025; Diriba et al., 2024). A classificação final ($\leq 0,30$; 0,30–0,90; 0,90–

1,30; 1,30–2,20; > 2,20 km/km²) assegura coerência com estudos aplicados em ambientes amazônicos e com faixas utilizadas em diferentes regiões do Brasil e do mundo para avaliação da vulnerabilidade a inundações (Kazakis et al., 2015; Ha-Mim et al., 2022).

A variável **precipitação anual** foi obtida a partir do conjunto climático WorldClim v2.1 (Fick & Hijmans, 2017), cuja série histórica (1970–2000) apresenta valores anuais de 1.939 a 2.641 mm para a área de estudo. A reclassificação foi feita em cinco intervalos homogêneos, centrados no histograma local, com destaque para valores superiores a 2.415 mm, sendo consideradas alta vulnerabilidade. A literatura demonstra que a elevada pluviosidade amazônica é determinante para a formação de planícies de inundação (Pimenta et al., 2025; Melack et al., 2009) e que a intensificação de eventos extremos tende a ampliar a magnitude das cheias (IPCC, 2022). Estudos aplicados em bacias tropicais reforçam que a precipitação total anual é critério-chave para suscetibilidade a inundações (Papaioannou et al., 2015; Daneshparvar et al., 2022; Ha-Mim et al., 2022).

Por fim, a **declividade**, derivada de dados de MDE (Copernicus), foi utilizada como indicador morfométrico fundamental. Em ambientes de baixa energia topográfica, como o estuário amazônico, declividades reduzidas ($\leq 0,5\%$) aumentam a permanência da lâmina d'água, motivo pelo qual receberam a maior pontuação. A classificação adotada ($\leq 0,5\%$; 0,5–2%; 2–5%; 5–12%; > 12%) foi definida a partir das convenções nacionais de classes de relevo (IBGE, 2009; EMBRAPA, 2018) e de trabalhos que relacionam topografia plana à vulnerabilidade a inundações (Tehrany et al., 2014; Kazakis et al., 2015; Fassoni-Andrade et al., 2023).

As fontes e os intervalos operacionais de todas as variáveis ambientais encontram-se consolidados na Tabela 3, assegurando comparabilidade e transparência na integração dos critérios no diagnóstico espacial.

As variáveis sociais utilizadas neste estudo foram selecionadas a partir do Censo Demográfico 2022 (IBGE, 2023a; <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>) e, também, reprojatadas, rasterizadas e reclassificadas em cinco categorias de vulnerabilidade social. Essa padronização permitiu traduzir diferentes dimensões de desigualdade em uma escala comparável, variando de muito baixa a muito alta vulnerabilidade.

No presente trabalho, a análise da renda per capita enfrentou limitações em razão da ausência, até o momento, da disponibilização oficial pelo IBGE da variável **“rendimento domiciliar per capita”** nos recortes tabulares do Censo Demográfico. As tabelas acessadas no SIDRA apresentam informações referentes apenas ao rendimento

médio mensal das pessoas responsáveis pelos domicílios particulares permanentes ocupados (variável V06004), não incluindo o rendimento total de todos os moradores do domicílio.

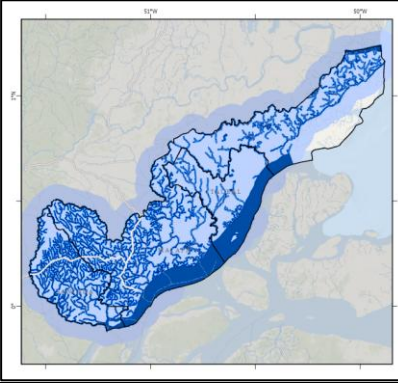
Diante dessa restrição, adotou-se um procedimento metodológico alternativo, em que se considerou o rendimento do responsável como uma aproximação do rendimento domiciliar. Reconhece-se, contudo, que tal escolha pode subestimar o valor efetivo, uma vez que não contempla a contribuição de outros moradores economicamente ativos.

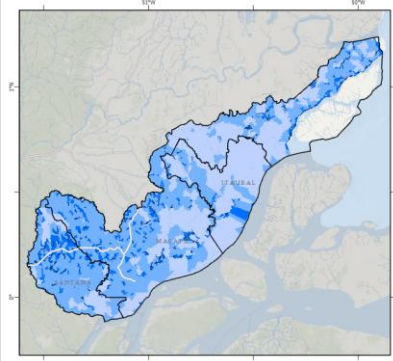
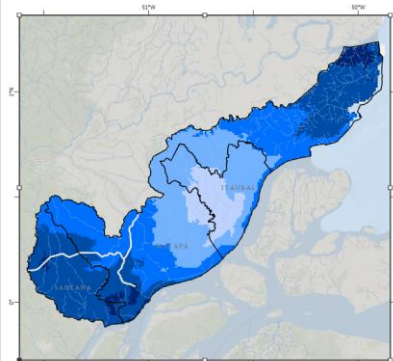
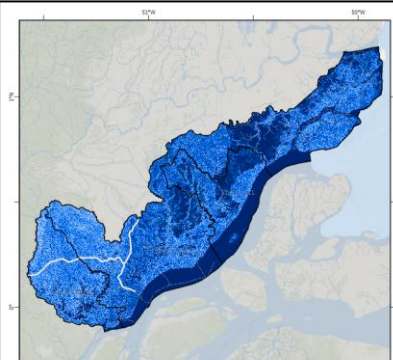
$$\text{Rendimento (R\$)} = \frac{\text{V6004 (Renda domiciliar per capita)}}{\text{V0005 (Domicílios Particulares Permanentes Ocupados, Quantidade de moradores)}}$$

Dessa forma, chegou-se a uma estimativa indireta do rendimento médio domiciliar per capita, reconhecendo-se que os valores encontrados tendem a ser inferiores à realidade observada.

Esse procedimento metodológico é justificado pela necessidade de integrar a dimensão socioeconômica às análises de vulnerabilidade ambiental e social, ainda que com ressalvas quanto à precisão absoluta dos resultados. Ressalta-se que, quando o IBGE disponibilizar a variável oficial de rendimento domiciliar per capita em nível censitário, recomenda-se a revisão e atualização dos valores apresentados, a fim de assegurar maior aderência às definições originais do instituto.

Tabela 3 - Critérios ambientais utilizados na análise multicritério de suscetibilidade a inundações. Intervalos reclassificados em cinco categorias de vulnerabilidade

Variável	Classe AHP	Intervalo	Interpretação	Vulnerabilidade	Resultados
Proximidade do rio (m)	1	> 600 m	Menor influência direta	Muito baixa	
	2	400–600 m	Alcançada por eventos mais severos	Baixa	
	3	250–400 m	Transição de risco	Moderada	
	4	100–250 m	Influência hidrológica ainda marcante	Alta	
	5	0–100 m	Faixa de maior frequência de transbordo/ressacas	Muito alta	
Densidade de drenagem (km/km²)	1	≤ 0,30	Planícies amplas, baixa dissecação	Muito baixa	
	2	0,30–0,90	Baixa a moderada conectividade de canais	Baixa	
	3	0,90–1,30	Rede moderada	Moderada	
	4	1,30–2,20	Rede densa, resposta mais rápida	Alta	

	5	> 2,20	Rede muito densa, alta concentração de escoamento	Muito alta	
Precipitação anual (mm/ano)	1	≤ 2.035	Totais menores no contexto regional	Muito baixa	
	2	2.035–2.160	Baixa-média	Baixa	
	3	2.160–2.290	Média	Moderada	
	4	2.290–2.415	Alta	Alta	
	5	> 2.415	Muito alta (zonas críticas de pluviosidade)	Muito alta	
Declividade (%)	1	> 12	Encostas mais íngremes (escoamento rápido)	Muito baixa	
	2	5–12	Encostas suaves-moderadas	Baixa	
	3	2–5	Transição para relevo suave	Moderada	
	4	0,5–2	Planícies/terraços baixos	Alta	
	5	≤ 0,5	Superfícies muito planas; água permanece	Muito alta	

A **variável renda domiciliar per capita** foi definida com base no salário mínimo vigente em 2022 (R\$ 1.212,00), alinhando os intervalos aos limiares de pobreza e extrema pobreza adotados em políticas públicas nacionais (MDS, 2014; IPEA, 2015). Valores inferiores a 0,25 SM foram considerados de muito alta vulnerabilidade por refletirem a condição de extrema pobreza, enquanto rendimentos superiores a 2 SM foram classificados como de muito baixa vulnerabilidade. Essa escolha segue evidências de que a renda constitui um dos principais determinantes da vulnerabilidade social, influenciando a capacidade de adaptação frente a riscos ambientais (Cutter et al., 2003).

Para a construção do indicador de **analfabetismo** foram utilizados os dados do Censo Demográfico 2022 disponibilizados pelo IBGE, a partir da amostra básica dos setores censitários. Considerou-se a população residente com 15 anos ou mais de idade, em consonância com a metodologia adotada pelos principais relatórios oficiais sobre

alfabetização no Brasil. O cálculo foi realizado pela razão entre o número de pessoas que declararam não saber ler e escrever e o total de pessoas da mesma faixa etária (alfabetizadas – V00900 e não alfabetizadas - V00901), resultando na taxa de analfabetismo expressa em termos percentuais:

$$\text{Taxa de analfabetismo} = \frac{V00901}{V00900 + V00901} \times 100$$

O indicador obtido foi posteriormente reclassificado em cinco classes de vulnerabilidade para sua incorporação na análise de decisão multicritério (AHP). As classes foram definidas de forma a refletir gradientes crescentes de vulnerabilidade social, em que taxas mais elevadas de analfabetismo correspondem a maiores limitações adaptativas da população frente a situações de risco. Para este trabalho, adotaram-se intervalos referenciais baseados em estudos nacionais sobre alfabetização: muito baixa (<5%), baixa (5–8%), moderada (8–12%), alta (12–20%) e muito alta (>20%). Os intervalos definidos seguem três referenciais principais: (i) a meta de erradicação do analfabetismo definida pela UNESCO e adotada pelo IBGE, que considera taxas inferiores a 5% como limiar aceitável; (ii) o Atlas da Vulnerabilidade Social (IPEA, 2015), que identifica taxas acima de 20% como críticas; e (iii) estudos aplicados em análise multicritério que utilizam divisões incrementais em faixas de 5 pontos percentuais para operacionalizar variáveis educacionais (Kazakis et al., 2015; Ha-Mim et al., 2022). O analfabetismo, nesse contexto, é considerado um marcador estrutural de exclusão social, associado a menores oportunidades de trabalho e menor acesso a políticas públicas (Mansur et al., 2016).

A variável referente à coleta de lixo domiciliar foi construída a partir dos dados do Censo Demográfico 2022 (IBGE), considerando os domicílios particulares permanentes ocupados. Para garantir consistência metodológica e evitar problemas de não resposta, o cálculo foi baseado diretamente nas categorias agregadas disponibilizadas pelo IBGE: lixo coletado no domicílio por serviço de limpeza (V00397), lixo depositado em caçamba de serviço de limpeza (V00398), lixo queimado na propriedade (V00399), lixo enterrado na propriedade (V00400), lixo jogado em terreno baldio, encosta ou área pública (V00401) e outro destino do lixo (V00402).

Nessa abordagem, os dois primeiros grupos foram classificados como coleta formal, enquanto os demais compuseram a categoria de ausência de coleta formal. O indicador foi calculado como a proporção de domicílios sem coleta formal em relação ao total de domicílios com resposta válida:

$$\% \text{ sem coleta formal} = \frac{V00399 + V00400 + V00401 + V00402}{V00397 + V00398 + V00399 + V00400 + V00401 + V00402} \times 100$$

Essa estratégia assegura que o denominador seja formado apenas pelos domicílios que declararam algum destino do lixo, eliminando potenciais distorções associadas ao uso do total de domicílios (V0007), que pode incluir registros sem resposta.

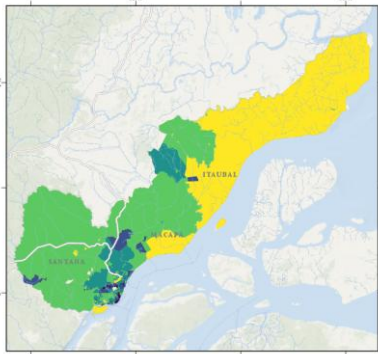
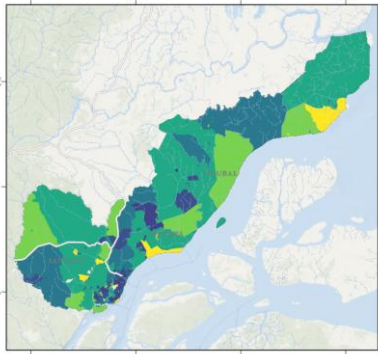
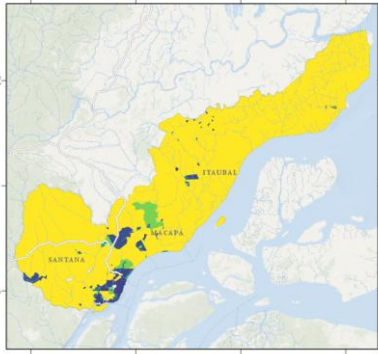
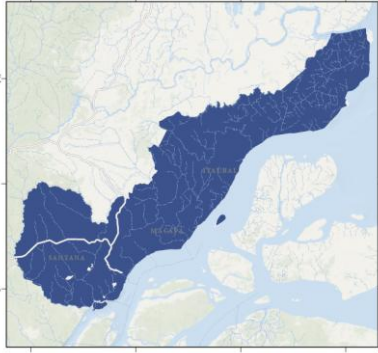
O indicador resultante foi reclassificado em cinco categorias para integração à análise multicritério (AHP), refletindo gradientes de vulnerabilidade social e ambiental: 0–5% (muito baixa), 5,1–15% (baixa), 15,1–30% (moderada), 30,1–50% (alta) e >50% (muito alta). Esses intervalos foram definidos com base em estudos nacionais e internacionais que reconhecem a ausência de serviços básicos de saneamento como um determinante da vulnerabilidade socioambiental (IPEA, 2015; Cutter et al., 2003). A literatura aponta que a ausência de coleta regular de resíduos amplia os riscos sanitários e ambientais em áreas urbanas periféricas, agravando desigualdades sociais e intensificando a exposição a desastres (Ha-Mim et al., 2022).

Por fim, a **variável registro de nascimento** foi representada pelo percentual de pessoas sem registro civil. A ausência desse documento básico é considerada uma forma crítica de exclusão social, pois impede o acesso a direitos fundamentais e políticas públicas. Para fins de reclassificação, adotaram-se os intervalos de 100 – 99%, 98,9 – 97%, 96,9 – 94%, 93,9 – 90% e < 90%, em consonância com parâmetros do Atlas da Vulnerabilidade Social (IPEA, 2015) e com estudos sobre cidadania e inclusão (Hunter et al., 2017). No contexto amazônico, a falta de registro civil amplia fragilidades institucionais e limita a capacidade de resposta comunitária frente a riscos ambientais, reforçando a associação entre exclusão social e vulnerabilidade (Mansur et al., 2016).

Assim, a classificação final das quatro variáveis sociais encontra-se sistematizada na Tabela 4, que sintetiza os intervalos, interpretações e níveis de vulnerabilidade adotados neste trabalho.

Tabela 4 - Critérios sociais utilizados na análise multicritério de suscetibilidade a inundações. Intervalos reclassificados em cinco categorias de vulnerabilidade.

Variável	Classe AHP	Intervalo	Interpretação	Vulnerabilidade	Resultados
Renda per capita (SM)	1	> 2,00 SM (> R\$ 2.425)	Maior capacidade adaptativa	Muito baixa	
	2	1,01 – 2,00 SM (R\$ 1.213-2.424)	Condição socioeconômica mais estável	Baixa	

	3	0,501 – 1,00 SM (R\$ 607 – 1.212)	Renda próxima ao piso	Moderada	
	4	0,251 – 0,50 SM (R\$ 304 – 606)	Pobreza	Alta	
	5	≤ 0,25 SM (≤ R\$ 303)	Extrema pobreza	Muito alta	
<i>Taxa de analfabetismo (≥15 anos)</i>	1	≤ 5%	Muito baixo analfabetismo	Muito baixa	
	2	5,1 – 10%	Baixo analfabetismo	Baixa	
	3	10,1 – 15%	Médio analfabetismo	Moderada	
	4	15,1 – 20%	Alto analfabetismo	Alta	
	5	> 20%	Muito alto analfabetismo	Muito alta	
<i>Coleta de lixo (domicílios sem coleta)</i>	1	0 – 5%	Coleta quase universal	Muito baixa	
	2	5,1 – 15%	Pequenas falhas de cobertura	Baixa	
	3	15,1 – 30%	Cobertura parcial	Moderada	
	4	30,1 – 50%	Grande deficiência	Alta	
	5	> 50%	Predomínio da ausência de coleta	Muito alta	
<i>Registro de nascimento (pessoas sem registro)</i>	1	100 – 99%	Registro quase universal	Muito baixa	
	2	98,9 – 97%	Pequenos déficits	Baixa	
	3	96,9 – 94%	Cobertura incompleta	Moderada	
	4	93,9 – 90%	Exclusão significativa	Alta	
	5	< 90%	Exclusão civil crítica	Muito alta	

3.4.2 Análise Multicritério (AHP)

A análise da vulnerabilidade socioambiental nesta pesquisa foi conduzida por meio do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), desenvolvido por Saaty (1980), amplamente utilizado em estudos de riscos naturais e planejamento ambiental. Essa abordagem permite a estruturação hierárquica dos critérios e a atribuição de pesos

relativos com base em julgamentos comparativos, contribuindo para a construção de um índice sintético fundamentado.

A estrutura hierárquica adotada nesta pesquisa foi composta por dois níveis principais: o primeiro com a distinção entre os grupos físico e social, e o segundo com os critérios específicos — declividade, densidade de drenagem, precipitação e distância ao rio (grupo físico); alfabetização, renda per capita, proporção de indivíduos sem registro civil e coleta de lixo (grupo social). A definição desses critérios foi baseada em revisão da literatura especializada (Tabela 5), com destaque para os estudos de Mansur et al. (2016), Ha-Mim et al. (2022), Kazakis et al. (2015), Seejata et al. (2018) e Waqas e Sajjad et al. (2021), que forneceram referência para a importância relativa desses fatores em contextos de risco à inundação.

Tabela 5 - Análise das metodologias e peso AHP utilizados em artigos internacionais.

Fonte: Autora (2024)

Referência	Variáveis (principais)	Pesos atribuídos (valores +relevantes)	Observações metodológicas
Ha-Mim et al. (2022)	Densidade populacional, tipo de moradia, alfabetização, emprego agrícola, distância ao rio, elevação	DFR: 0,346; Elevação: 0,211; Alfabetização: 0,131; CR: 0,0361	Uso de matriz de comparação paritária e índice de consistência; CR < 0,1 garantiu validade da ponderação
Daneshparvar et al. (2022)	Elevação, declive, precipitação, distância ao rio, uso do solo, NDVI	Elevação: 0,31; Declive: 0,20; Precipitação: 0,10; Uso do solo: 0,05	Pesos extraídos via software Super Decisions com base em escala de Saaty (1–9)
Waqas e Sajjad et al. (2021)	Distância ao rio, densidade de drenagem, solo, precipitação, geologia	Distância ao rio: 32,17; Densidade drenagem: 21,77; Chuva: 6,87; CR: 0,737	Integração dos métodos AHP + FR; pesos gerados com escalas contínuas; validação por CR

A atribuição dos pesos foi realizada a partir de matrizes de comparação pareada, construídas por meio da plataforma *AHP Online System (AHP-OS)*, utilizando a escala fundamental de Saaty. O julgamento dos pares de critérios foi fundamentado na literatura e complementado por consulta a especialistas com conhecimento técnico na região de estudo e em geotecnologias aplicadas à análise ambiental. As matrizes de comparação foram validadas por meio do cálculo da razão de consistência (CR), adotando-se como aceitável o limite de 0,10.

Os pesos obtidos a partir dessas matrizes foram aplicados posteriormente às variáveis especializadas e normalizadas, permitindo a construção de um índice de

vulnerabilidade que expressa a integração entre os fatores físicos e sociais da área de estudo.

3.4.3. Integração dos Dados e Geração do Mapa de Risco

As manchas de inundação simuladas foram integradas aos mapas de vulnerabilidade em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Foram aplicadas técnicas de reamostragem (para 30 metros) e cruzamento espacial para garantir a compatibilidade entre as camadas. Essa integração permitiu representar espacialmente as áreas de maior risco, a partir da sobreposição entre os fatores físicos e sociais, resultando em produtos cartográficos destinados à gestão de riscos.

A lógica metodológica adotada teve como base o princípio de que as evidências devem sustentar a hipótese formulada, sendo testadas em diferentes planos de informação (Câmara, 2001). A associação entre métodos de predição, análise espacial e geotecnologias possibilitou um diagnóstico robusto das vulnerabilidades nas áreas estudadas.

A última etapa metodológica consistiu na sobreposição entre os dados de vulnerabilidade, estimados por meio da análise multicritério AHP, e os dados de inundação gerados a partir da modelagem hidrodinâmica. Essa análise teve como finalidade a elaboração de um mapa final de risco de inundação, espacialmente explícito, representando a sobreposição entre as áreas com maior propensão a alagamentos e aquelas com populações mais vulneráveis.

As manchas de inundação foram delimitadas a partir das cotas simuladas pelo modelo SCHISM, considerando o percentil 99,5% dos níveis d'água como limiar de referência, conforme discutido por Lyddon et al. (2018) e Haigh et al. (2010). Essa abordagem permitiu representar cenários extremos de inundação, associados a eventos hidrológicos severos. A aplicação dessa cota sobre o Modelo Digital de Elevação (MDE) resultou na delimitação das áreas potencialmente alagáveis nos três municípios da área de estudo.

A base de dados corresponde ao período de 1º de janeiro de 2014 a 31 de dezembro de 2017, totalizando quatro anos completos de observações. Os dados estão organizados no formato “xlsx” no qual se detêm dos valores de nível da água em metros “*Water level* (m)”, representando a série observada, e “*Correction value*”, correspondente à série simulada já corrigida com um acréscimo de +0,74 metros. Para avaliar a diferença entre a simulação original e a corrigida, foi aplicada uma correção de +0,74 m à série simulada

original, de modo a alinhar os valores modelados com os níveis observados, compensando um viés sistemático identificado durante a calibração do modelo.

A fim de estabelecer um limiar para eventos de cheia extrema, foi calculado o percentil 99,5% da série corrigida para cada ano do período analisado. A média desses percentis resultou em uma cota que foi adotada como referência para a simulação de cenários de inundação.

Paralelamente, os mapas de vulnerabilidade foram produzidos a partir da combinação dos critérios físicos e sociais, ponderados conforme os pesos derivados da aplicação do AHP. Todos os dados foram processados em ambiente de SIG, aonde foram reamostrados, normalizados e convertidos para o mesmo sistema de projeção e resolução espacial (30 metros).

3.4.4. Mancha de inundação

A análise entre as manchas de inundação e os índices de vulnerabilidade foi realizada por meio de sobreposição raster, utilizando álgebra de mapas. O resultado foi um mapa de risco composto por cinco classes (muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto risco), permitindo identificar espacialmente os setores urbanos (gerados a partir do setor censitário) e rurais mais expostos e vulneráveis da Região Metropolitana de Macapá e do município de Itaubal.

Essa abordagem integrada permitiu associar as dimensões físicas do fenômeno hidrológico aos fatores socioeconômicos que amplificam seus efeitos, possibilitando uma análise espacialmente detalhada dos padrões de risco à inundação e fornecendo subsídios técnicos para ações de planejamento e gestão de desastres.

Para a definição das áreas potencialmente suscetíveis à inundação, inicialmente foi necessário realizar o ajuste da série de dados simulados pelo modelo hidrodinâmico SCHISM. A modelagem hidrodinâmica bruta, previamente executada, gerou uma série simulada de níveis d'água que foi comparada com dados observados obtidos na estação de monitoramento localizada no município de Santana, abrangendo o período de 01/01/2014 a 31/12/2017.

Para validar a série simulada pelo modelo SCHISM e utilizar as cotas como base para a delimitação das manchas de inundação, foi realizada uma análise quantitativa por meio do cálculo da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), comparando os dados observados de nível d'água da estação de monitoramento de Santana com os valores simulados corrigidos. A aplicação da correção de +0,74 metros as cotas do modelo

SCHISM visou minimizar o viés sistemático identificado na calibração inicial. Após a correção, o RMSE (Equação 1) foi calculado para todo o período de 01/01/2014 a 31/12/2017, permitindo quantificar a qualidade da simulação frente aos dados observados.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}$$

Equação 1- Fórmula do RMSE.

Onde “ S_i ” representa os valores simulados corrigidos, e “ O_i ” os valores observados, e “ n ” o número total de observações. O valor obtido para o RMSE foi de 0,742 metros, indicando um erro médio aceitável para o contexto de modelagem hidrodinâmica e demonstrando que a correção aplicada foi eficaz para alinhar a série simulada aos dados reais. Esse resultado valida o uso da série corrigida na definição da cota de referência baseada no percentil 99,5%, adotada na delimitação das manchas de inundação.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

4.1 Validação das Simulações de áreas de inundação

A série de dados simulados continha um total de 210.384 registros, com frequência de observação de 10 minutos. A diferença entre as duas médias revelou um viés sistemático de -0,74 m no modelo. Em função disso, aplicou-se uma correção aditiva ao conjunto de dados simulados, acrescentando 0,74 m em cada registro da série modelada, de modo a compatibilizar os resultados com a realidade hidrológica observada no estuário amazônico. Vale ressaltar, contudo, que o ajuste aplicado pressupõe a constância do viés sistemático ao longo da série temporal, desconsiderando possíveis variações do erro do modelo decorrentes de regimes de maré, sazonalidade fluvial e eventos meteorológicos extremos, o que deve ser considerado na interpretação dos resultados.

Com a série corrigida, foi realizado o processamento dos valores máximos anuais para estimativa das cotas extremas de inundação. Para tanto, utilizou-se o percentil 99,5% aplicado separadamente para cada ano da série validada (figura 7). O resultado por ano obtido: 3,99 m (2014), 3,87 m (2015), 3,64 m (2016) e 3,85 m (2017). A média dos quatro anos resultou em uma cota final de 3,83 m, a qual foi adotada como referência para a simulação dos cenários de cheia extrema.

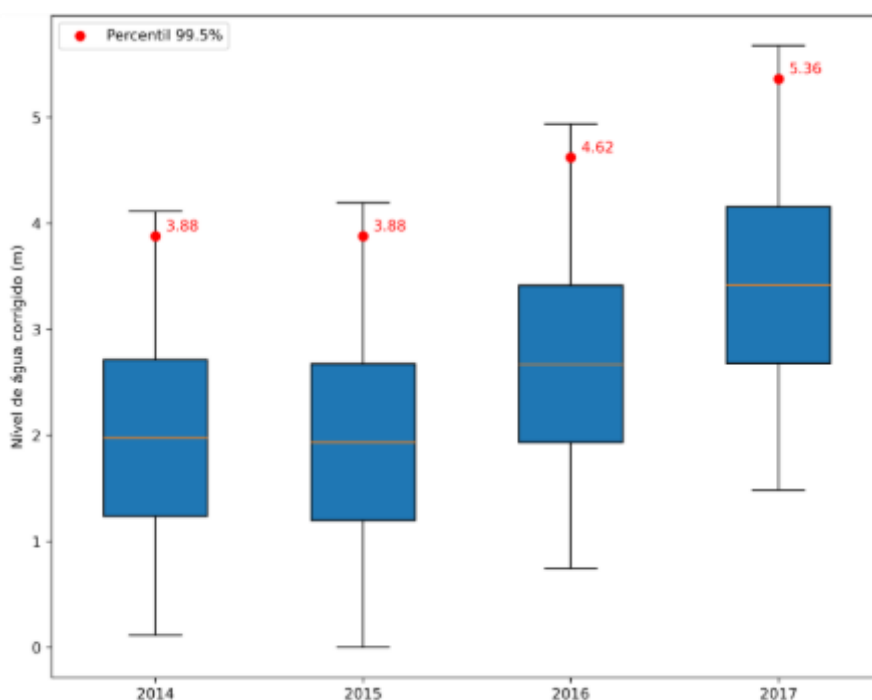


Figura 7 - Distribuição dos valores anuais máximos de nível d'água (percentil 99,5%) para o período 2014–2017, utilizados para definição da cota de referência de inundação.

A base de dados corresponde ao período de 1º de janeiro de 2014 a 31 de dezembro de 2017, totalizando quatro anos completos de observações da série simulada. Por meio de um percentil de 99,5% da série obteve-se uma cota de 3,83 metros, que foi adotada como referência para a simulação de cenários de inundação. A cota apresentou consistência estatística e correspondência com os valores máximos registrados nos eventos críticos e em reportagens da época, confirmando sua adequação como parâmetro de referência hidrológica.

Com a cota definida, procedeu-se à espacialização das manchas de inundação. O Modelo Digital de Elevação (*MDE Copernicus*), com resolução de 30 metros, foi utilizado como base altimétrica. Em ambiente de SIG, aplicou-se a subtração altimétrica dos valores do MDE em relação à cota de referência. As áreas cuja altitude foi inferior ou igual a 3,83 m foram classificadas como suscetíveis à inundação (figura 8).

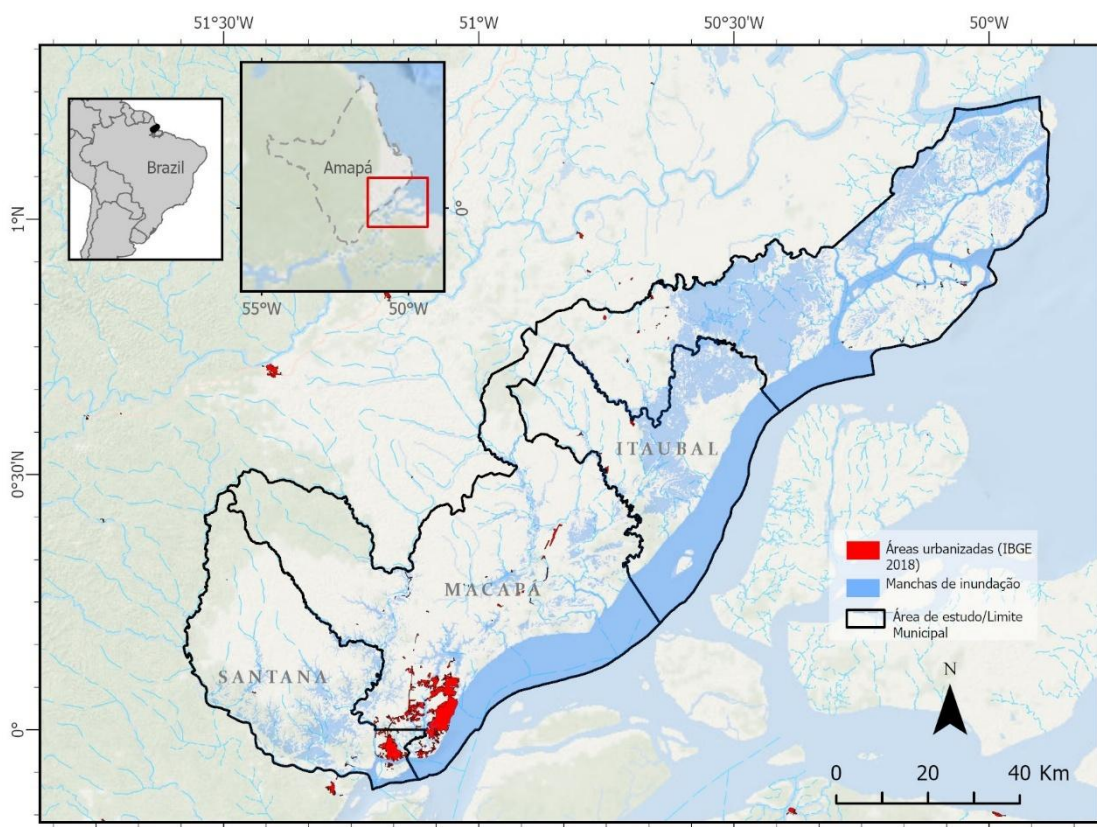


Figura 8 - Mancha de inundação gerada a partir da aplicação da cota de referência de 3,83 m sobre o Modelo Digital de Elevação (MDE Copernicus, 30 m de resolução), representando as áreas suscetíveis à inundação extrema na Região Metropolitana de Macapá e no município de Itaubal.

As manchas resultantes mostraram áreas significativas das zonas periféricas de Macapá e Santana encontraram-se dentro da área de inundação potencial, sobretudo em bairros que historicamente apresentam problemas recorrentes de alagamento devido à combinação de baixa declividade, ausência de drenagem adequada e expansão urbana não planejada. Em Itaubal, a mancha de inundação concentrou-se em áreas rurais e de várzea, que por sua natureza topográfica e hidrológica já são caracteristicamente sujeitas a processos sazonais de alagamento. Ressalta-se que o resultado obtido reflete um cenário de inundação média, baseado na média dos percentis 99,5% dos níveis d'água simulados. Em caso de eventos extremos, como em cheias excepcionais associadas a eventos extremos climáticos, a extensão das áreas inundáveis poderia ser significativamente maior.

A mancha gerada nesta etapa constituiu o insumo físico fundamental para a integração com o índice de vulnerabilidade socioambiental, apresentada nas etapas seguintes deste capítulo.

4.2 Análise Multicritério (AHP)

Como já apresentado na metodologia, a definição dos critérios adotados como entrada foi precedida de revisão bibliográfica nacional e internacional, considerando tanto a literatura consolidada em análise de vulnerabilidade social no contexto amazônico (Mansur et al., 2016), quanto estudos recentes que aplicaram o AHP a cenários de inundação em diversas realidades territoriais (Ha-Mim et al., 2022; Kazakis et al., 2015; Seejata et al., 2018; Waqas & Sajjad, 2021). Além disso, foi realizada consulta a especialistas da área de recursos hídricos, geociências e planejamento urbano, cujas contribuições orientaram a atribuição relativa de pesos entre os critérios.

Como resultado, os critérios foram organizados em dois grandes grupos: variáveis físicas, que representam a suscetibilidade natural à inundação, e variáveis sociais, que expressam a capacidade adaptativa e a exposição socioeconômica da população (Tabelas 2 e 3). A razão de consistência obtida para a matriz consolidada foi de 0,074, valor abaixo do limiar recomendado (0,1), indicando excelente nível de consistência nas comparações realizadas. Esse resultado confirma que as ponderações atribuídas pelos especialistas mantiveram estabilidade lógica ao longo da estrutura hierárquica, conferindo robustez estatística aos pesos gerados. Assim, obteve-se uma distribuição de pesos relativamente equilibrada entre os dois grupos principais de variáveis (Tabela 6).

Tabela 6 - Pesos globais (Gbl Prio.) atribuídos às variáveis na análise multicritério AHP

Grupo (nível 1)	Variável (nível 2)	Peso Global (%)
Físico (50,5%)	Declividade (24,7%)	12,5%
	Precipitação (26,1%)	13,2%
	Distância ao rio (25%)	12,6%
	Densidade de drenagem (24,1%)	12,2%
Social (49,5%)	Analfabetismo (24,5%)	12,1%
	Coleta de lixo (26,5%)	13,1%
	Registro civil (22,0%)	10,9%
	Renda per capita (27,0%)	13,4%

No nível 1, os fatores físicos apresentaram um peso global de 50,5%, indicando ligeira predominância em relação aos fatores sociais (49,5%). Dentro da categoria física, a precipitação foi o critério mais influente (13,2%), seguida da distância aos rios (12,6%) e da declividade (12,5%), enquanto a densidade de drenagem obteve o menor peso (12,2%). Esse resultado sugere que, para os especialistas, a intensidade das chuvas e a proximidade de corpos d'água desempenham papel central na definição da vulnerabilidade da área de estudo.

A aplicação da AHP às variáveis físicas (nível 2, Figura 8) indicou média de 2,6, com mediana próxima (2,6) e desvio-padrão de 0,58. Os valores mais elevados ocorreram em áreas próximas aos cursos d'água e em zonas de baixa declividade, especialmente nas planícies ribeirinhas dos municípios analisados. Esses setores apresentam maior suscetibilidade física à inundação, reflexo direto das características geomorfológicas e hidrodinâmicas do estuário amazônico.

O dado não foi processado para as ilhas da foz (porção sudeste da área), pois o arquivo de drenagem da ANA as classifica como ilhas oceânicas. Para o recorte das áreas urbanas, a estatística indicou média de 3,03 e desvio-padrão de 0,47, reforçando que a concentração populacional em zonas baixas e próximas ao rio aumenta a vulnerabilidade física a inundação.

Para os fatores sociais, a variável renda per capita (0,270 – 13,4%) aparece como a mais influente, seguida por coleta de lixo (0,265 – 13,1%) e analfabetismo (0,245 – 12,1%). O registro de nascimento (0,220 – 10,9%) apresentou o menor percentual global. A forte influência da renda per capita indica que aspectos econômicos são determinantes para definir o grau de vulnerabilidade da população exposta aos riscos.

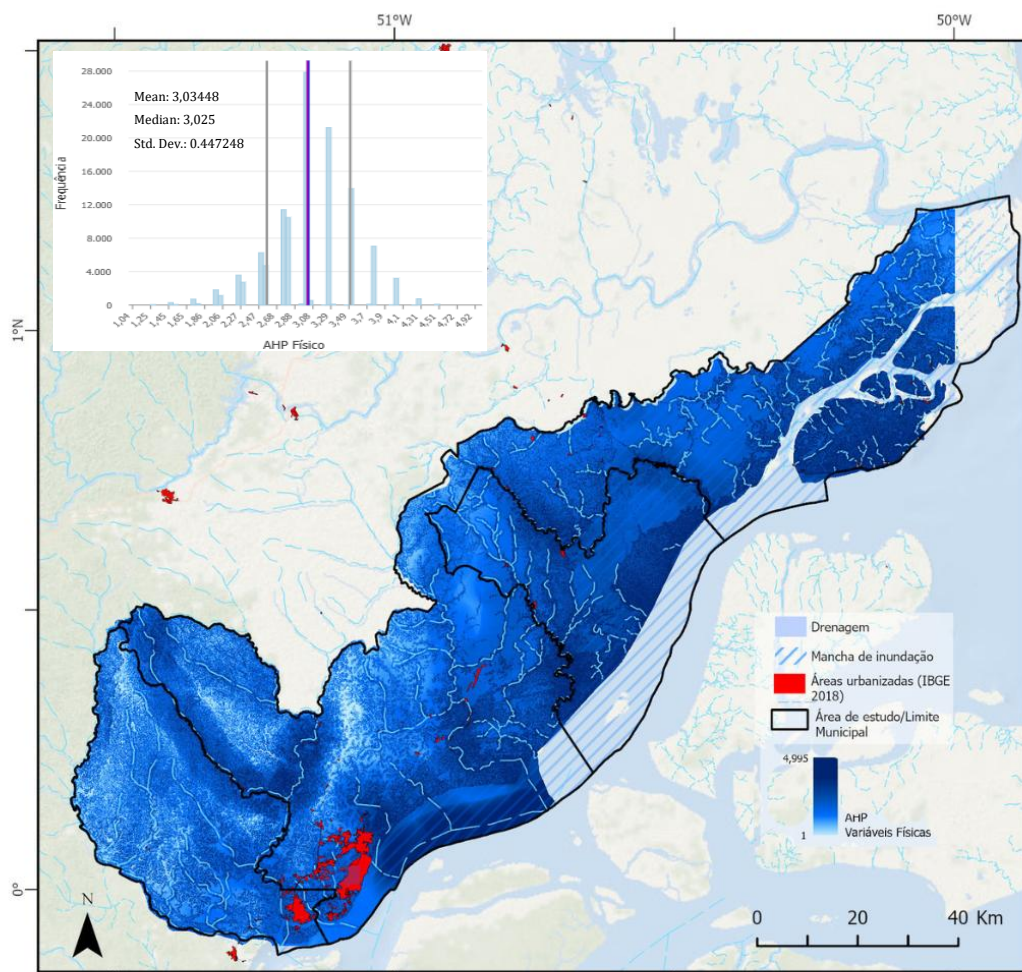


Figura 9 - Resultado da AHP aplicada às variáveis físicas (escala 1 a 5) da Região Metropolitana de Macapá; em B, apresenta-se o histograma estatístico da distribuição da AHP para as áreas urbanas da região de estudo (IBGE, 2018).

Para os fatores sociais, a variável renda per capita (0,270 – 13,4%) aparece como a mais influente, seguida por coleta de lixo (0,265 – 13,1%) e analfabetismo (0,245 – 12,1%). O registro de nascimento (0,220 – 10,9%) apresentou o menor percentual global. A forte influência da renda per capita indica que aspectos econômicos são determinantes para definir o grau de vulnerabilidade da população exposta aos riscos.

O mapa de vulnerabilidade social apresentou valores variando de 1 a 4,12, destacando setores urbanos periféricos de Macapá e Santana como as áreas de maior vulnerabilidade, em razão do acúmulo de déficits socioeconômicos, como precariedade habitacional, baixa cobertura de infraestrutura urbana e restrições de acesso a serviços básicos. A distribuição estatística da AHP social apontou média de 3,422, mediana de

3,384 e desvio-padrão de 0,3704, evidenciando predominância de valores entre níveis moderado e alto de vulnerabilidade.

A aplicação da AHP nas variáveis sociais (nível 2) apresentou resultados irregulares em função da amostragem por setores censitários (Figura 9). No recorte específico para as áreas urbanas, observou-se média de 1,93 e desvio-padrão de 0,60, refletindo maior heterogeneidade espacial associada às desigualdades socioeconômicas locais.

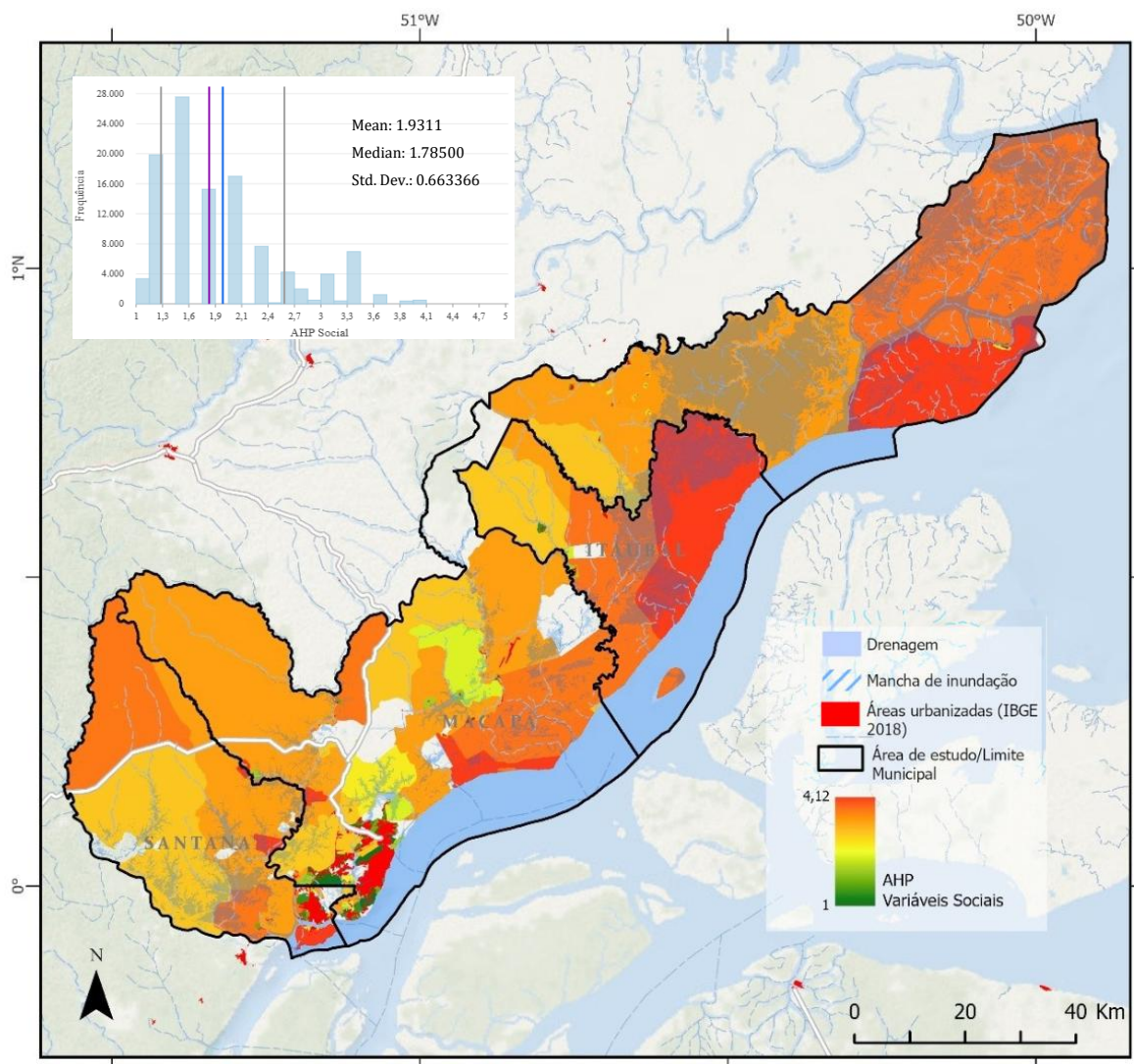


Figura 6 - Resultado da AHP aplicada às variáveis sociais (escala 1 a 5) nos setores censitários da Região Metropolitana de Macapá; em B, apresenta-se o histograma estatístico da distribuição da AHP para as áreas urbanas da região de estudo (IBGE, 2018).

4.3. Geração do Mapa de Vulnerabilidade

Posteriormente, foi realizada a integração dos dois mapas temáticos — físico e social — respeitando a ponderação global atribuída a cada grupo de variáveis para o nível

1 da AHP. A combinação resultou no mapa integrado de vulnerabilidade (figura 11), com valores variando entre 1 e 4,322, representando a síntese espacial das fragilidades físicas e sociais existentes na área de estudo.

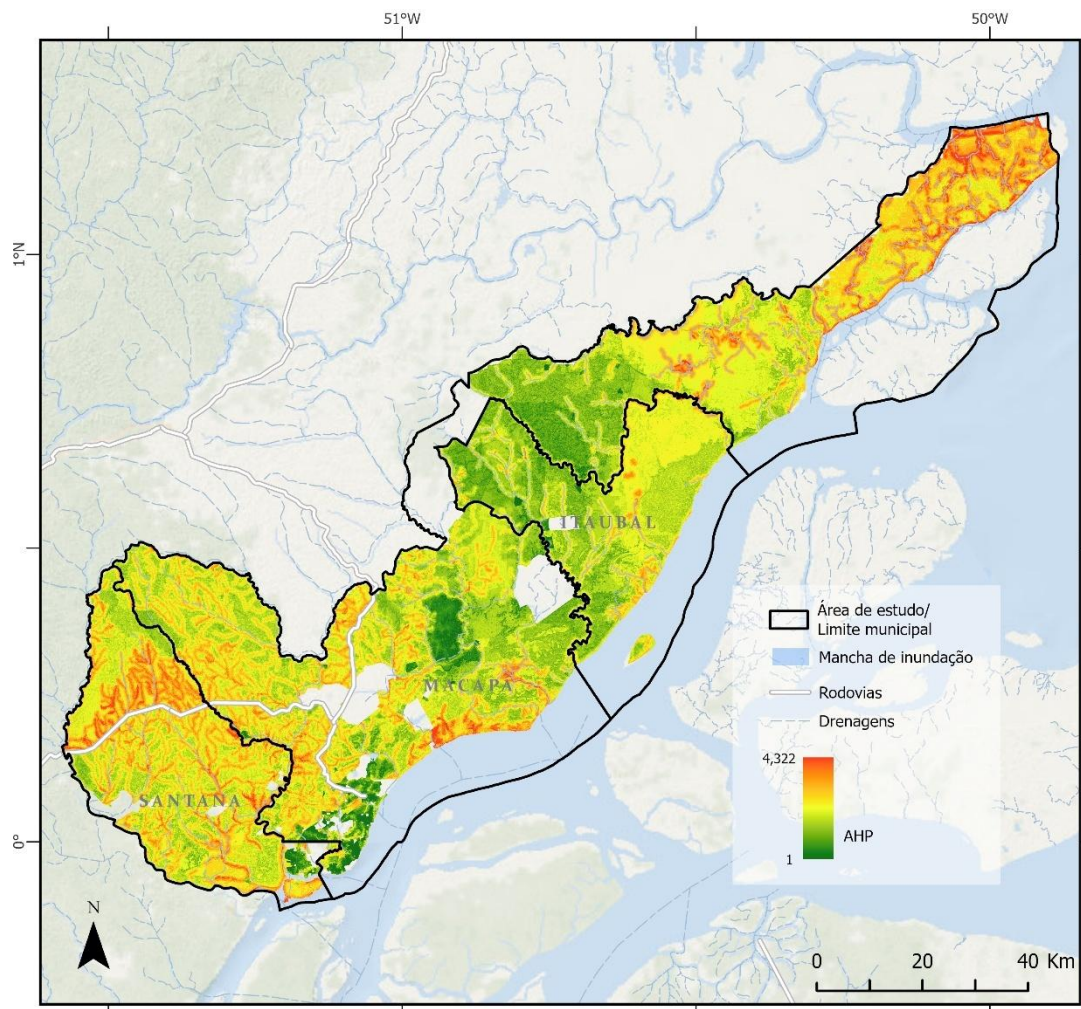


Figura 11 - Resultado da AHP integrada (variáveis físicas e sociais) nos setores censitários da Região Metropolitana de Macapá, em escala de 1 a 5. Observa-se a distribuição espacial do índice de vulnerabilidade socioambiental (áreas em branco representam áreas sem dados).

Do ponto de vista estatístico, o índice AHP integrado apresentou valores variando entre 1,52 e 4,32, com média de 2,98, mediana de 2,94 e desvio-padrão de 0,33, indicando concentração da maior parte dos setores censitários (área total) em níveis de vulnerabilidade moderada a alta. O coeficiente de assimetria ($skewness = 0,15$) aponta leve tendência de concentração em valores acima da média, enquanto a curtose próxima a 3 ($kurtosis = 3,19$) sugere distribuição aproximadamente normal. Esses resultados reforçam que, embora existam áreas críticas bem delimitadas (periferias urbanas de Macapá e cinturão ribeirinho de Santana), a vulnerabilidade é relativamente homogênea

em boa parte do território, mantendo padrão consistente com as características socioambientais do estuário amazônico.

A análise espacial do índice integrado de vulnerabilidade (AHP físico + social) revela padrões contrastantes entre os municípios da Região Metropolitana de Macapá. Em Macapá, observa-se predomínio de valores moderados a altos de vulnerabilidade nas periferias urbanas, sobretudo em áreas próximas ao rio Amazonas e em setores de baixa cota altimétrica, onde a suscetibilidade a inundações se combina com déficits socioeconômicos. O núcleo central da cidade, por outro lado, apresenta níveis relativamente mais moderados, embora ainda relevantes no contexto de risco, refletindo maior acesso a infraestrutura urbana e serviços públicos.

Em Santana, a vulnerabilidade mais elevada se concentra no cinturão ribeirinho, especialmente em bairros próximos ao porto e às margens do rio Amazonas e de seus afluentes. Nessas áreas, a combinação de fatores naturais — variações sazonais do nível do rio e baixa declividade — com condições sociais frágeis, como habitações informais e ausência de saneamento, intensifica a exposição ao risco. Já no interior do município, afastado da margem fluvial, predominam valores intermediários, representados por tons amarelos a verdes, que indicam menor sobreposição de fatores críticos.

O município de Itaubal apresenta predominantemente valores baixos de vulnerabilidade (tons verdes), o que reflete menor densidade populacional e menor pressão antrópica sobre o território. Ainda assim, algumas áreas litorâneas e mais afastadas exibem valores moderados (amarelos), evidenciando que o isolamento geográfico e a carência de infraestrutura básica também constituem formas de fragilidade social. As áreas rurais e de floresta localizadas ao norte e centro da região aparecem em verde escuro, reforçando o padrão de baixa vulnerabilidade, coerente com a baixa densidade demográfica e a maior cobertura natural que contribui para a proteção ambiental.

Cabe destacar que o cálculo do índice integrado foi impactado pela ausência de dados em alguns setores censitários e pela exclusão das ilhas situadas na porção sudeste da área de estudo, classificadas nos bancos oficiais como ilhas oceânicas. Essas lacunas geram áreas nulas no mapeamento, o que pode resultar em uma representação parcial da vulnerabilidade e, em determinados casos, “mascarar” informações relevantes sobre populações que residem nessas regiões. Essa limitação deve ser considerada na interpretação dos resultados, reforçando a necessidade de aprimoramento das bases

censitárias e hidrográficas para capturar de forma mais precisa as condições socioambientais do estuário amazônico.

4.4 Sobreposição das Manchas e da Vulnerabilidade: Mapa de Risco

Com a conclusão das etapas de aplicação da modelagem hidrodinâmica e análise multicritério, realizou-se a integração dos produtos gerados com vistas à elaboração do mapa final de risco de inundação. O processo de integração consistiu na sobreposição espacial entre a mancha de inundação simulada — delimitadas a partir da cota de referência de 3,83 metros — e o mapa de vulnerabilidade integrada obtido via AHP. A Figura 11 apresenta o mapa de risco de inundação obtido pela sobreposição da vulnerabilidade socioambiental integrada (AHP) com a mancha de inundação simulada para a cota de referência de 3,83 metros. O mapa está representado em escala contínua de 1 a 4,322, variando de tons verdes (menor risco) a vermelhos (maior risco).

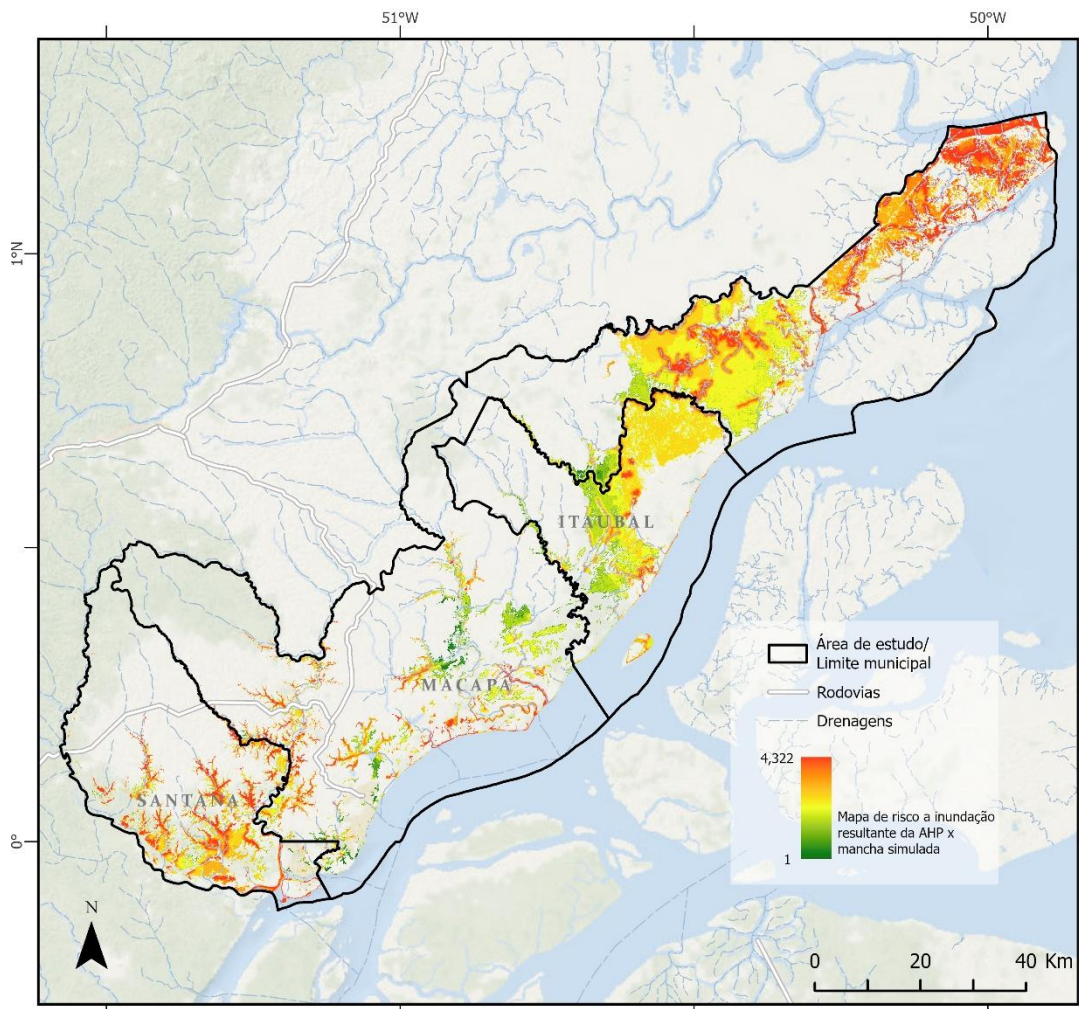


Figura 12 - Mapa de risco de inundação resultante da sobreposição das manchas de inundação simuladas (cota de referência 3,83 m) com o índice de vulnerabilidade integrada

obtido pela AHP. A integração evidencia as áreas de maior risco na Região Metropolitana de Macapá, onde a suscetibilidade física à inundação se sobrepõe às fragilidades socioeconômicas

No município de Macapá, observam-se extensas áreas em amarelo, laranja e vermelho nas porções periféricas, sobretudo no setor sul e oeste, enquanto a área central apresenta predomínio de valores intermediários. Em Santana, o risco mais elevado ocorre ao longo do cinturão ribeirinho, com forte concentração de áreas em tons alaranjados e vermelhos próximos ao rio Amazonas e a seus afluentes. O interior municipal exhibe principalmente valores intermediários, em tons de amarelo e verde.

O município de Itaubal apresenta predominância de áreas em verde e amarelo, correspondentes a valores de risco baixo a moderado. Em setores litorâneos e de baixa altitude, aparecem manchas em tons alaranjados, indicando valores mais elevados dentro do município. Nas áreas rurais e florestadas localizadas ao norte e centro da região de estudo, a representação é majoritariamente em verde escuro, indicando risco baixo.

Do ponto de vista estatístico, os valores do índice de risco variaram entre 1,65 e 4,32, com média de 3,14, mediana de 3,07 e desvio-padrão de 0,31. A distribuição apresentou leve assimetria positiva ($skewness = 0,38$) e curtose de 3,26, próxima à normal.

A partir da aplicação do limiar de 2,5 nesse dado, foi possível elaborar uma máscara binária que distinguiu os pixels válidos daqueles descartados, representando a ocorrência espacial dos valores considerados relevantes (médio a alto risco) para a análise. A sobreposição dessa máscara com os polígonos censitários possibilitou quantificar, em cada unidade espacial, a proporção de células classificadas em faixas de média a alta vulnerabilidade. Esse resultado foi incorporado ao shapefile, permitindo calcular a porcentagem de área exposta em cada setor e associá-la ao número de moradores residentes nas regiões censitárias (Figura 13).

A Figura 13 apresenta a distribuição espacial da porcentagem de área exposta em setores censitários da Região Metropolitana de Macapá. O mapa está dividido em duas partes: na porção superior, observa-se a localização regional com destaque para os municípios de Macapá e Santana, além dos setores censitários coloridos segundo classes de exposição, variando de até 30% (tons claros) até 75–100% (tons vermelhos). Sobrepostos a esses setores, encontram-se símbolos proporcionais à população total residente, representados por figuras geométricas de diferentes tamanhos (de 1–500: diamante, 501–1000: círculo e 1001–2411: diamante).

Na porção inferior do mapa, em maior escala, é mostrada a área urbana de Macapá e Santana sobre imagem de satélite, permitindo visualizar os setores censitários destacados em tons de laranja e vermelho, indicando maior porcentagem de área exposta. A composição evidencia espacialmente a localização e a intensidade das áreas de exposição por setores censitários, sem análise interpretativa dos padrões.

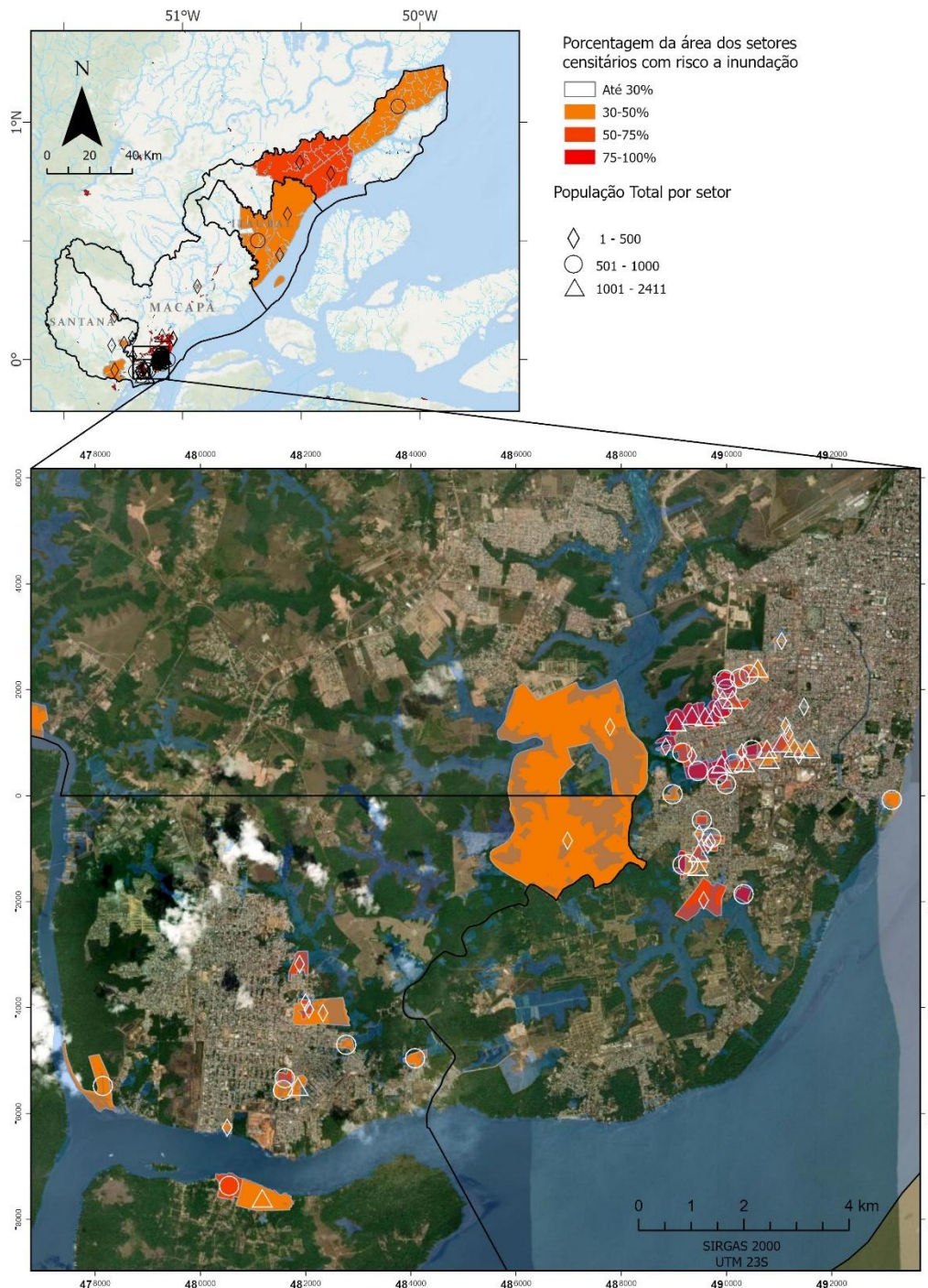


Figura 13 - Distribuição espacial da porcentagem de área exposta em cada setor censitário da Região Metropolitana de Macapá, obtida a partir da sobreposição da máscara

binária de vulnerabilidade média a alta com os polígonos setoriais e porcentagem de área exposta e o número de moradores residentes por setor censitário.

5. DISCUSSÃO

A análise dos critérios físicos revelou padrões territoriais coerentes com a morfologia estuarina e as características geomorfológicas da região. Áreas com baixa declividade, elevada precipitação, alta densidade de drenagem e proximidade de rios configuraram os setores de maior vulnerabilidade física. Esse resultado está em consonância com estudos conduzidos por Papaioannou et al. (2015), que destacam a influência de topografia plana e drenagem deficiente como fatores críticos para a suscetibilidade a inundações em contextos urbanos da Europa. Dinâmicas semelhantes são apontadas por Muthusamy (2019) e Daneshparvar et al. (2022), que evidenciam a intensificação do escoamento superficial em regiões tropicais com solos saturados, ampliando os efeitos de eventos hidrológicos extremos. No contexto amazônico, tais processos se agravam devido à interação entre cheias sazonais, variações de maré e o comportamento fluvial-estuarino do rio Amazonas, como demonstrado por Fassoni-Andrade et al. (2023). Nos três municípios analisados, os maiores valores de vulnerabilidade física foram observados em setores ribeirinhos — várzeas urbanas e zonas rurais baixas. Em Itaubal, esse padrão se intensifica em razão da ocupação histórica de áreas de planície alagável, caracterizadas por baixa capacidade de drenagem, em consonância com a tipologia proposta por Mansur et al. (2016) para municípios amazônicos. Já a porção leste da área de estudo, correspondente ao município de Macapá, constitui uma região de intersecção entre o rio Amazonas e o oceano Atlântico, condição que amplia a suscetibilidade a alagamentos em razão da sobreposição das dinâmicas fluviais e marítimas. Os resultados confirmam a pertinência de análises integradas como a aqui empregada, reforçando a robustez metodológica e a atualidade das conclusões no contexto amazônico.

Na dimensão social, os resultados derivados do Censo 2022 indicaram persistência de fragilidades estruturais em setores com baixos índices de renda per capita, elevada taxa de analfabetismo, ausência ou precariedade da coleta de lixo e presença de sub-registro civil. A renda per capita, variável mais influente na análise multicritério, reafirma a centralidade dos fatores econômicos na definição do grau de vulnerabilidade. A taxa de analfabetismo, que em 2010 era de 8,4% no estado do Amapá, apresentou variação mínima em 2022, atingindo 8,47% (IBGE, 2010; IBGE, 2022), revelando estagnação no enfrentamento desse indicador. Esse resultado contrasta com a média

nacional, que apresentou tendência de redução mais expressiva no mesmo período, evidenciando que a realidade amapaense permanece distante de avanços observados em outros estados brasileiros. Tal permanência limita a capacidade de acesso à informação e compromete estratégias de adaptação e resposta frente a desastres, conforme já discutido por Ha-Mim et al. (2022) e Tehrany et al. (2014) em contextos do sul e sudeste asiático.

Outro aspecto relevante refere-se à baixa densidade populacional característica da região, que apenas pode ser observada de forma precisa na escala de setores censitários. Essa configuração implica uma amostragem espacial não regular, com setores de tamanhos muito distintos, situação que representa uma limitação metodológica quando se trabalha com análises espaciais em ambiente SIG. Em áreas como Itaubal, por exemplo, setores extensos com poucos domicílios podem gerar distorções na representação cartográfica da vulnerabilidade, mascarando desigualdades locais. A coleta formal de resíduos sólidos, por sua vez, ocorre quase exclusivamente em áreas urbanas, o que restringe sua capacidade de refletir a realidade das zonas rurais, onde predominam formas alternativas de destinação do lixo. Isso implica um viés metodológico semelhante ao do registro civil, cuja cobertura se manteve praticamente uniforme entre os municípios (97% dos registros realizados em cartório). Ambas as variáveis — coleta de lixo e registro civil — tiveram influência reduzida na diferenciação espacial da vulnerabilidade, funcionando, em grande medida, como fatores neutros na AHP. Nesse sentido, as variáveis que de fato estruturaram a vulnerabilidade social foram a renda per capita e o analfabetismo, cuja heterogeneidade espacial é mais marcante e impactante para a exposição ao risco de inundações.

A análise integrada entre vulnerabilidade e manchas de inundação simuladas evidenciou padrões socioespaciais diretamente associados à estrutura urbana e aos déficits históricos de planejamento territorial. Embora os mapas apontem maior concentração de setores expostos em Santana e Macapá, com Itaubal apresentando vulnerabilidade proporcionalmente mais acentuada, não é possível quantificar com precisão a população afetada, uma vez que os dados censitários são agregados por setor e estes não correspondem integralmente às áreas inundáveis. Assim, os valores obtidos devem ser compreendidos como aproximações espaciais, que indicam a tendência de maior concentração de população em áreas classificadas como de risco alto e muito alto. Ainda assim, a sobreposição das manchas de risco com os setores censitários revelou que, nas classes de risco mais elevadas, predominam bairros periféricos, várzeas e assentamentos informais, confirmando o padrão descrito por Kazakis et al. (2015), no

qual os riscos são redistribuídos para populações com menor renda, menor poder político e reduzida capacidade adaptativa, configurando situações de injustiça ambiental. Em Macapá, porções dos bairros Zerão, Congós, Marabaixo e Novo Buritizal se destacaram por reunir alta densidade populacional, vulnerabilidade social e localização em áreas de várzea sujeitas a alagamentos recorrentes. Em Santana, os bairros Provedor, Paraíso, Fortaleza e Ilha de Santana apresentaram configuração semelhante, combinando fragilidade social, ocupação informal e forte suscetibilidade física às inundações. Esses achados convergem com Daneshparvar et al. (2022), ao apontarem a interseção entre urbanização não planejada e exposição ao risco em áreas de baixa elevação.

A interpretação das estimativas populacionais por classes de risco reforçou a desigualdade territorial observada, ainda que sem quantificação absoluta de pessoas diretamente atingidas. O padrão espacial obtido demonstra que os setores mais críticos não são necessariamente os mais populosos, mas aqueles onde há sobreposição entre suscetibilidade física elevada e fragilidade social persistente, confirmando o conceito de risco como construção social discutido por Cardona (2004) e Cutter et al. (2003). Esse quadro é particularmente marcante no estuário amazônico, onde a combinação de forçantes fluviais e oceânicas — cheias sazonais e marés — amplia os impactos de eventos extremos, como demonstrado por Fassoni-Andrade et al. (2023).

Os resultados obtidos oferecem subsídios relevantes para o aprimoramento das políticas públicas de gestão de risco e planejamento urbano. Em Itaubal, destaca-se a necessidade de fortalecimento da governança local e ampliação do acesso a políticas básicas, como saneamento, educação e regularização fundiária. Em Santana e Macapá, as intervenções devem priorizar áreas de ocupação informal e periferias em várzeas, com medidas de drenagem urbana, reassentamento planejado e urbanização resiliente, conforme sugerido por Siqueira (2019) e Daneshparvar et al. (2022). A aplicação conjunta em ambiente SIG da modelagem hidrodinâmica e do AHP demonstrou-se eficaz e replicável, podendo ser incorporada a instrumentos de planejamento como Planos Diretores, Planos de Contingência da Defesa Civil e Planos Municipais de Saneamento Básico. Como destacado por Kazakis et al. (2015), metodologias transparentes e replicáveis favorecem a legitimidade das decisões e estimulam a participação de múltiplos atores no planejamento territorial.

A integração entre dados censitários atualizados (2022), modelagem hidrodinâmica e análise multicritério permitiu identificar áreas prioritárias para ação pública, ampliando a precisão e a atualidade do diagnóstico de risco. Os produtos gerados

oferecem suporte para ações de curto, médio e longo prazo, incluindo monitoramento contínuo, definição de áreas críticas para intervenção emergencial, obras de contenção e drenagem e elaboração de estratégias de adaptação às mudanças climáticas. Como argumentam Tehrany et al. (2014), a gestão eficiente do risco depende de bases espaciais confiáveis e de dados integrados — características atendidas por esta pesquisa.

Assim, a análise evidencia que a vulnerabilidade no estuário amazônico é resultado de múltiplas dimensões sobrepostas, combinando suscetibilidade física, fragilidade social e déficits institucionais. A heterogeneidade observada entre Macapá, Santana e Itaubal reforça a necessidade de abordagens territorializadas, adaptadas às especificidades de cada município. Os resultados aqui apresentados funcionam não apenas como diagnóstico, mas como instrumento de apoio a políticas públicas de mitigação, adaptação e prevenção. A permanência de indicadores críticos entre 2010 e 2022, como as taxas de analfabetismo e a precariedade da coleta de lixo, confirma que a vulnerabilidade social segue como componente central do risco no estuário amazônico. A reversão desse quadro depende de políticas estruturantes, que combinem investimentos em infraestrutura, fortalecimento institucional e inclusão social, garantindo o direito à cidade e à resiliência para populações historicamente expostas às inundações.

5. CONCLUSÃO

A pesquisa demonstrou que a vulnerabilidade socioambiental no estuário amazônico resulta da sobreposição de fatores físicos e sociais. Áreas de baixa declividade, solos saturados e proximidade de corpos d'água mostraram-se particularmente suscetíveis, sobretudo em várzeas urbanas e rurais, onde a combinação de processos fluviais e marinhos intensificaram a exposição aos eventos extremos (inundações). Essa configuração territorial se traduz em um risco que não é apenas natural, mas ampliado com os fatores sociais, afetando de forma mais aguda populações periféricas e em situação de vulnerabilidade socioeconômica.

Assim, análise social evidenciou a persistência de fragilidades estruturais, como baixos índices de renda per capita e estagnação nas taxas de analfabetismo entre 2010 e 2022. Essas limitações comprometem a capacidade de adaptação e resposta dessas populações, reforçando desigualdades históricas que se manifestam na distribuição espacial do risco. Observou-se que os setores mais críticos não correspondem necessariamente aos mais populosos, mas àqueles onde se sobrepõem suscetibilidade

física elevada e fragilidade social persistente, confirmando a ideia de risco como um princípio de construção social.

Os resultados também revelaram disparidades territoriais relevantes: enquanto Santana e Macapá concentram o maior número absoluto de setores em risco, em Itaubal a vulnerabilidade proporcional é mais acentuada, refletindo tanto limitações institucionais quanto a ocupação histórica de áreas de planície alagável. Em Macapá e Santana, destacaram-se bairros periféricos e ocupações informais em várzeas, onde há correspondência entre densidade populacional, déficits urbanos e suscetibilidade física.

A aplicação integrada através da AHP e SIG adotada nesta pesquisa mostrou-se uma ferramenta eficaz para subsidiar a tomada de decisão, podendo ser incorporada a instrumentos de planejamento como os Planos Diretores Municipais, os Planos de Contingência da Defesa Civil e os Planos Municipais de Saneamento Básico. Como destacado por Kazakis et al. (2015), o uso de modelos transparentes e replicáveis favorece a inclusão de múltiplos atores no processo de planejamento, promovendo maior legitimidade às decisões territoriais. Esses dados quantitativos, coleta de lixo, registro de nascimento e taxa de analfabetismo, quando cruzados com variáveis físicas como proximidade de rios, declividade, precipitação e densidade de drenagem através da AHP, consolidam a interpretação de que as áreas mais vulneráveis são aquelas onde os fatores socioeconômicos e territoriais se sobrepõem.

Além disso, os mapas gerados permitem ações de curto, médio e longo prazo, incluindo: (i) priorização de áreas para monitoramento e alerta; (ii) definição de setores críticos para intervenção emergencial; (iii) planejamento de obras de contenção e drenagem; e (iv) elaboração de estratégias de adaptação às mudanças climáticas. Como ressaltado por Tehrany et al. (2014), a gestão eficiente do risco requer base espacial precisa e dados integrados — características plenamente atendidas pelos produtos desta pesquisa.

Em termos práticos, os achados reforçam a necessidade de políticas com olhares voltados aos territórios e multissetoriais: em Itaubal, com ênfase no fortalecimento de políticas públicas e infraestrutura urbanas e no acesso a serviços básicos; em Santana e Macapá, com foco em obras de drenagem, urbanização resiliente e regularização fundiária em áreas críticas.

Por fim, os resultados aqui apresentados reforçam a importância de integrar conhecimento técnico, dados científicos e participação das populações locais na formulação de políticas de enfrentamento às inundações na Amazônia. A realidade

heterogênea entre os municípios analisados evidencia a necessidade de abordagens territorializadas, capazes de responder às especificidades socioambientais dos contextos urbanos e rurais da região estuarina amazônica. Reconhecer que o risco está acompanhado de desigualdades históricas é fundamental para a construção de cidades resilientes e adaptadas às dinâmicas complexas do ambiente amazônico.

6. BIBLIOGRAFIA

ADGER, W. N. *Vulnerability. Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, v. 16, n. 3, p. 268–281, 2006. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Dados abertos – Base Hidrográfica Ottocodificada 2017 5K - trecho de drenagem.** Disponível em:

<https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/5b97dc790ebc4307938d8a5b089c1aab0/about>. Acesso em: 20 abr. 2025.

ALMEIDA, R. M.; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; RENNÓ, C. D.; PAZ, A. R. **High sediment load and hydrodynamics control floodplain inundation and vegetation productivity in Amazon River wetlands.** *Remote Sensing*, v. 8, n. 2, p. 104, 2016.

AVELINO, Gabriela Freitas. *Comparação de modelos de análise multicritério para determinação de vulnerabilidade futura à inundação em Nova Lima/MG.* 2024. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/81319>

BEST, J. **Anthropogenic stresses on the world’s big rivers.** *Nature Geosci* 12, 7–21 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0262-x>

BPMSG. **AHP Online System.** Disponível em: <https://bpmsg.com/ahp/>. Acesso em: 5 jan. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. *Proteção e Defesa Civil: introdução à Política Nacional – Curso 1.* Brasília, DF: MDR, 2021.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M.; D’ALGE, J. C. **Técnicas de inferência geográfica.** In: *Introdução à ciência da geoinformação.* São José dos Campos: INPE, 2001. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro>. Acesso em: 30 jun. 2023.

CARDONA, O. D. **The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: A necessary review and criticism for effective risk management.** Universidad Nacional de Colombia, 2004.

- CASTRO, F. **Riscos urbanos: entre vulnerabilidade social e risco ambiental.** *Cadernos Metrópole*, v. 9, n. 17, p. 115–132, 2007.
- CHAMBERS, R. **Vulnerability, coping and policy.** *IDS Bulletin*, 1989.
- COULET, C.; BINET, R.; DURAND, F.; SOUZA, E. N. **Understanding the contribution of tide, discharge, and atmospheric forcing to annual maximum water levels in the Amazon estuary using SCHISM.** 2025.
- CUTTER, S. L.; BORUFF, B. J.; SHIRLEY, W. L. **Social vulnerability to environmental hazards.** *Social Science Quarterly*, v. 84, n. 2, p. 242–261, 2003.
- DANG, A. T. N.; KUMAR, L. **Application of remote sensing and GIS-based hydrological modelling for flood risk analysis: a case study of District 8, Ho Chi Minh City, Vietnam.** *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, v. 8, n. 2, p. 1792–1811, 2017. DOI: 10.1080/19475705.2017.1388853.
- DANESHPARVAR, H.; RANJBAR, M. H.; POURGHASEMI, H. R. **Flood susceptibility mapping using AHP and FR models: a case study from Iran.** *Natural Hazards*, v. 110, p. 977–1000, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04976-z>.
- DIÁRIO DO AMAPÁ. **Cheia do Amazonas pode causar inundações em Macapá.** 2015. Disponível em: <https://www.diariodoamapa.com.br/cadernos/cidades/cheia-do-amazonas-pode-causar-inundacoes-em-macapá/>. Acesso em: 20 abr. 2025.
- DIRIBA, Dechasa; KARUPPANNAN, Shankar; TAKELE, Tariku; HUSEIN, Musa. **Delineation of groundwater potential zonation using geoinformatics and AHP techniques with remote sensing data.** *Heliyon*, v. 10, n. 3, p. e25532, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25532>
- FASSONI-ANDRADE, Alice César; DURAND, Fabien; AZEVEDO, Alberto; BERTIN, Xavier; SANTOS, Leandro Guedes; KHAN, Jamal Uddin; TESTUT, Laurent; MOREIRA, Daniel Medeiros. **Seasonal to interannual variability of the tide in the Amazon estuary.** *Continental Shelf Research*, v. 255, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2023.104945>. ISSN 0278-4343.
- ESRI. ArcGIS Pro: **GIS mapping and analytics software.** Disponível em: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>. Acesso em: 20 abr. 2025.

FASSONI-ANDRADE, A. C. *Mapeamento e caracterização do sistema rio-planície da Amazônia central via sensoriamento remoto e modelagem hidráulica*. 2020. 167 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – INPE, São José dos Campos.

FASSONI-ANDRADE, A. C.; PAIVA, R. C. D.; TRIGUEIRO, R. M.; LIMA, C. A.; ALMEIDA, R. M.; FONSECA, A. **Hydrodynamic modeling of Amazon estuarine systems under compound flooding scenarios**. *Environmental Modelling & Software*, v. 160, p. 105561, 2023.

FASSONI-ANDRADE, A. C.; DURAND, F.; BINET, R. **Seasonal tidal propagation patterns in the Amazon River estuary: Modeling insights**. *Journal of Hydrology*, 2023.

FASSONI-ANDRADE, A. C.; SOUZA, E. N.; DURAND, F. **Bathymetric reconstruction and tidal modeling of the Amazon River estuary using multiple data sources**. *Remote Sensing*, 2021.

Fick, S. E.; Hijmans, R. J. (2017). **WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas**. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

G1 AP. **Estudo aponta que mais de 20% da população de Santana vive em áreas de risco para alagamento**. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/estudo-aponta-que-mais-de-20-da-populacao-de-santana-vive-em-areas-de-risco-para-alagamento.ghtml>. Acesso em: 20 abr. 2025.

G1 AP. **Maré alta no Rio Amazonas provoca alagamentos em Macapá**; veja vídeo. 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/2025/03/31/mare-alta-no-rio-amazonas-provoca-alagamentos-em-macapa-veja-video.ghtml>. Acesso em: 20 abr. 2025.

GIRD+10. *Caderno Técnico de Gestão Integrada de Riscos e Desastres*. Brasília: MDR; SNDC, 2021.

GLOBOPLAY. **Alagamentos atingem diversos bairros de Macapá**. [vídeo]. 2024. Disponível em: <https://globoplay.globo.com/v/12367702/>. Acesso em: 20 abr. 2025.

GODSCHALK, D. R. **Disaster mitigation and hazard management**. In: DRABEK, T. E.; HOETMER, G. J. (ed.). *Emergency management: principles and practice for local government*. Washington: ICMA, 1991. p. 131–160.

GOVERNO DO AMAPÁ. **Defesa Civil alerta para riscos de inundação em Macapá e Santana.** 2016. Disponível em: <https://www.amapa.gov.br/noticia/1705/defesa-civil-alerta-para-riscos-de-inundacao-em-macapá-e-santana>. Acesso em: 20 abr. 2025.

HA-MIM, S.; ALAM, M. J.; AHMED, M. R.; RANA, M. M.; KHAN, M. H. **Flood vulnerability mapping using AHP and geospatial techniques: a case study in the northern region of Bangladesh.** *Water*, v. 14, n. 2, p. 192, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14020192>.

HAIGH, I.; NICHOLLS, R.; WELLS, N. **Assessing changes in extreme sea levels: Application to the English Channel, 1900–2006.** *Continental Shelf Research*, v. 30, n. 9, p. 1042–1055, 2010.

HUNTER, Wendy; SUGIYAMA, Natasha Borges. **Making the Newest Citizens: Achieving Universal Birth Registration in Contemporary Brazil.** *Journal of Development Studies*, v. 54, n. 3, p. 397–412, 2017. DOI:10.1080/00220388.2017.1316378.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Demográfico 2010: características da população e dos domicílios – resultados do universo.** Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **População em áreas de risco no Brasil: 2010.** Rio de Janeiro: IBGE, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Atlas geográfico escolar – Brasil 1 por 1.** Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Área territorial brasileira 2020.** Rio de Janeiro: IBGE, 2021b.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Estimativas da população residente com data de referência 1 de julho de 2020.** Rio de Janeiro: IBGE, 2021a.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **hgeoHNOR2020: modelo de conversão de altitudes geométricas (GNSS) para o datum vertical.** Rio de Janeiro, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Áreas urbanizadas do Brasil: 2019.** Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE.
Censo Demográfico 2022. Disponível em:
<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ap/macapa/panorama>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE.
Censo 2022: População e Domicílios - Primeiros Resultados. Rio de Janeiro:
IBGE, 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2022: impacts, adaptation and vulnerability.** In: PÖRTNER, H.-O. et al. (ed.). *Sixth Assessment Report of the IPCC.* Cambridge: Cambridge University Press, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.

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

JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F.; SCHÖNGART, J.; WITTMANN, F. **A classification of major natural habitats of Amazonian white-water river floodplains (várzeas).** *Wetlands Ecology and Management*, v. 20, p. 461–475, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11273-012-9268-0>.

KAZAKIS, N.; VASILIKOS, C.; KOUTSOYIANNIS, D.; KAZAKI, E.; VOUTSA, D. **Flood hazard assessment modeling using multi-criteria decision analysis.** *Science of the Total Environment*, v. 538, p. 555–563, 2025.

LYDDON, C.; BROWN, J. M.; LEONARDI, N.; PLATER, A. J. **Uncertainty in estuarine extreme water level predictions due to surge-tide interaction.** *PLOS ONE*, v. 13, n. 10, e0206200, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206200>.

MANSUR, A. V.; MARQUES, D. B.; RIBEIRO, A. A.; CORDEIRO, R. C.; FORMIGA-JOHNSON, R. M.; MENDIONDO, E. M. **Vulnerability and risk: A multidimensional analysis of flood exposure in the Brazilian Amazon.** *Natural Hazards*, v. 83, p. 951–973, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2369-z>.

MANSUR, A. V.; PINHO, P. F.; BRONDÍZIO, E. S.; ROY, S. **Vulnerability and risk: Tools for improving planning and disaster resilience in urban delta regions.** *Sustainability*, v. 8, n. 9, p. 946, 2016.

MAJEED, M.; TARIQ, S.; IQBAL, J.; ALI, A.; USMAN, M.; NASIR, A.; SHAFQAT, A. **Prediction of flash flood susceptibility using integrating analytic hierarchy process (AHP) and frequency ratio (FR) algorithms.**

- Frontiers in Environmental Science*, v. 10, 1037547, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1037547>.
- MELACK, J. M.; NOVO, E. M. L. M.; FORSBERG, B. R.; PIEDADE, M. T. F.; MAURICE, L. **Floodplain ecosystem processes**. In: *Amazonia and Global Change*. 2009.
- MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO SOCIAL E COMBATE À FOME – MDS. **Plano Brasil Sem Miséria: caderno de resultados 2011–2014**. Brasília: MDS, 2014.
- MUTHUSAMY, M. **Coastal flood vulnerability mapping using remote sensing and GIS: a case study of Vedaranyam block, Nagapattinam district, Tamil Nadu, India**. *Geology, Ecology, and Landscapes*, v. 3, n. 1, p. 41–52, 2019.
- MUTHUSAMY, M. **Flood risk mapping using AHP and GIS: A case study in India**. *Hydrology: Current Research*, 2019.
- NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. **Mudanças climáticas e Amazônia**. *Ciência e Cultura*, v. 59, n. 3, p. 22–27, 2007.
- PAPAIOANNOU, G.; VASILIADES, L.; LOUKAS, A. **Multi-criteria analysis framework for potential flood prone areas mapping**. *Water Resources Management*, v. 29, p. 399–418, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0817-6>.
- PHAM, B. T.; PRADHAN, B.; SHARMA, R.; LEE, S.; BUI, D. T. **A novel ensemble approach using soft computing models for flood susceptibility mapping**. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 54, 102001, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.102001>.
- PIMENTA, L.; DUARTE, L.; TEODORO, A. C.; BELTRÃO, N.; GOMES, D.; OLIVEIRA, R. **GIS-Based Flood Susceptibility Mapping Using AHP in the Urban Amazon: A Case Study of Ananindeua, Brazil**. *Land*, v. 14, n. 8, p. 1543, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/land14081543>
- PNDC. **Política Nacional de Defesa Civil**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2007.
- PNUD; IPEA; FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil 2013**. Brasília, 2013.
- PREFEITURA DE MACAPÁ. **Prefeitura de Macapá decreta situação de emergência por alagamentos e inundações**. 2024. Disponível em:

<https://macapa.ap.gov.br/prefeitura-de-macapa-decreta-situacao-de-emergencia-por-alagamentos-e-inundacoes/>. Acesso em: 20 abr. 2025.

QUISHPE, Miguel; ACOSTA-VARGAS, Irene; BUENAÑO, Adrian; ROSERO, Bryan; REYES, Maria; DURAN, Gustavo; ZALAKEVICIUTE, Rasa. **Vulnerability and climate risk assessment in the Ecuadorian Amazon Region, based on ecological and socioeconomic infrastructures**. *Climate Risk Management*, Amsterdam, v. 49, p. 100736, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crm.2025.100736>.

SALATI, E. **Mudanças climáticas e o ciclo hidrológico na Amazônia**. In: *Causas e dinâmica do desmatamento na Amazônia*. Brasília: MMA, 2001. p. 153–172.

SAATY, T. L. **Optimization by the analytic hierarchy process**. University of Pennsylvania, 1979.

SAATY, T. L. **How to make a decision: the Analytic Hierarchy Process**. *European Journal of Operational Research*, v. 48, n. 1, p. 9–26, 1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-1](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-1).

SANTANA, Natalia Fernanda Jeronimo de; SILVA, Simone Rosa da; LAFAYETTE, Kalinny. **Análise da vulnerabilidade à inundação da bacia hidrográfica do Rio Una**. *Geografia em Atos (Online)*, Presidente Prudente, v. 9, p. e025004, 2025. DOI: <https://doi.org/10.35416/2025.10733>. Disponível em: <https://revista.fct.unesp.br/index.php/geografiaematos/article/view/10733>

Shao, W.; Jackson, N. P.; Ha, H.; Winemiller, T. **Assessing community vulnerability to floods and hurricanes along the Gulf Coast of the United States**. *Disasters*, v. 44, n. 3, p. 518–547, 2020

SANYAL, J.; LU, X. **Application of Remote Sensing in Flood Management with Special Reference to Monsoon Asia: A Review**. *Natural Hazards*, v. 33, p. 283–301, 2004.

SEEJATA, K.; YODYING, A.; WONGTHADAM, T.; MAHAVIK, N.; TANTANEE, S. **Assessment of flood hazard areas using Analytical Hierarchy Process over the Lower Yom Basin, Sukhothai Province**. *Procedia Engineering*, Amsterdam, v. 212, p. 340–347, 2018. DOI: [10.1016/j.proeng.2018.01.044](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.01.044).

SIQUEIRA, V. C. **Análise da vulnerabilidade socioambiental aos desastres naturais na Região Metropolitana do Recife/PE**. 2019. Dissertação (Mestrado

em Desenvolvimento Urbano) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SIPPEL, S. J.; HAMILTON, S. K.; MELACK, J. M. **Inundation area and morphometry of lakes on the Amazon River floodplain, Brazil.** *Archiv für Hydrobiologie*, v. 123, p. 385–400, 1992.

TEHRANY, M. S.; PRADHAN, B.; JAGADISH, S. **Flood susceptibility mapping using a novel ensemble model of support vector machine and frequency ratio.** *Hydrology Research*, v. 45, n. 4–5, p. 679–695, 2014.

TENG, J.; JAKEMAN, A. J.; VAZE, J.; CROKE, B. F. W.; DUTTA, D.; KIM, S. **Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis.** *Environmental Modelling & Software*, v. 90, p. 201–216, 2017.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC. **Gestão de riscos de desastres.** Florianópolis: CEPED/UFSC, 2012.

WARD, P. J.; WINSEMIUS, H. C.; VELDKAMP, T. I. E.; KURTIS, C. A.; HALL, J. W. **Assessing flood risk at the global scale: Model setup, results, and sensitivity.** *Journal of Hydrology*, v. 523, p. 760–775, 2011.

WAQAS, H.; KHAN, H.; ALAM, A.; SHAH, S. T.; KHAN, M. A. **Flash flood susceptibility assessment and zonation using an integrating Analytic Hierarchy Process and Frequency Ratio model for the Chitral District, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan.** *Water*, v. 13, n. 9, p. 1234–1255, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13091234>.

APÊNDICE A: Resultados Consolidados da Consulta aos Especialistas

Especialista	Formação	Declive (%)	Chuva (%)	Distância até o rio (%)	Densidade de drenagem (%)	Analfabetismo (%)	Coleta de lixo (%)	Registro de nascimento (%)	Renda per capita (%)	CRmax (%)
Resultado Grupo		12,5	13,2	12,6	12,2	12,1	13,1	10,9	13,4	0,1
1	Geógrafo	7,6	17,8	21,8	12,8	11,2	9,2	6,8	12,8	2,4
2	Agrônomo e docente UnB	0,8	4,9	1,3	3,0	7,4	31,4	5,3	45,9	35,2
3	Geólogo e docente UnB	10,2	10,8	13,1	9,6	12,2	6,7	16,6	19,4	4,1
4	Geólogo	13,9	14,8	9,2	15,0	12,2	13,2	9,6	12,0	0,6
5	Geógrafo	12,5	12,5	12,9	12,1	11,0	13,3	12,5	13,3	0,3
6	Geólogo	10,7	10,7	8,2	6,1	5,9	48,2	4,9	5,3	0,5
7	Geólogo	6,9	17,4	17,4	8,3	5,5	7,0	9,8	27,6	7,4
8	Engenheiro Civil	7,6	9,7	8,3	10,1	14,4	18,6	13,1	18,2	0,9
9	Geógrafo	13,2	12,8	12,8	14,1	11,4	12,9	11,7	11,0	0,6
10	Geofísico	5,4	3,1	2,0	14,5	28,8	5,8	23,5	17,0	7,4
11	Geógrafo	9,1	15,9	43,6	6,4	4,0	11,9	2,3	6,9	11,3
12	Engenheiro Ambiental	8,9	29,2	4,5	7,3	13,5	10,9	4,1	21,5	6,4
13	Geólogo	16,9	18,9	17,5	21,7	5,1	6,1	6,1	7,7	11,2
14	Geógrafo	3,3	12,4	27,7	6,6	7,9	23,8	4,6	13,7	11,3
15	Engenheiro Agrícola	6,6	8,4	56,2	6,6	12,6	5,6	4,3	2,5	6,7
16	Geólogo	17,7	8,4	15,6	5,4	10,3	15,2	4,0	23,5	6,9
17	Engenheiro Ambiental	18,8	35,1	8,6	12,5	3,1	8,6	1,8	11,5	6,9
18	Geógrafo	22,9	8,8	22,9	20,3	2,1	14,4	2,1	6,5	6,0
19	Engenheiro Florestal	19,6	11,1	2,8	2,3	33,8	11,3	15,6	3,5	12,1
20	Engenheiro Civil	23,3	23,3	8,7	14,0	5,1	8,5	4,3	12,9	3,8