



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DE RISCOS E DESASTRES
NATURAIS NA AMAZÔNIA

ANGELO BRUNO BATALHA SILVA

**MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES URBANAS COM USO DE RADAR DE
ABERTURA SINTÉTICA PARA O MUNICÍPIO DE MARABÁ-PA**

BELÉM-PARÁ
2025

ANGELO BRUNO BATALHA SILVA

**MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES URBANAS COM USO DE RADAR DE
ABERTURA SINTÉTICA PARA O MUNICÍPIO DE MARABÁ-PA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia da Universidade Federal do Pará (PPGGRD-UFPa), como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia.

Área de concentração: Minimização de Riscos e Mitigação de Desastres Naturais na Amazônia

Linha de pesquisa: Vulnerabilidade de Populações em Áreas de Risco.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Milena Marília Nogueira de Andrade

BELÉM-PARÁ
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586m Silva, Angelo Bruno Batalha.
Mapeamento de inundações urbanas com uso de radar de abertura sintética para o município de Marabá-PA / Angelo Bruno Batalha Silva. — 2025.
86 f. + (Produto Técnico 10f : il. color).

Orientador(a): Prof^ª. Dra. Milena Marília Nogueira de Andrade

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Gestão de
Risco e Desastre na Amazônia, Belém, 2025.

Produto Técnico: “Roteiro metodológico ara mapeamento de
inundações urbanas com uso de dados SAR no perímetro urbano de
Marabá-PA”

1. Desastres. 2. Risco. 3. SAR. 4. Google Earth Engine. I. Título. II.
Título. “Roteiro metodológico ara mapeamento de inundações urbanas
com uso de dados SAR no perímetro urbano de Marabá-PA”

CDD 363.3409811

ANGELO BRUNO BATALHA SILVA

**MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES URBANAS COM USO DE RADAR DE
ABERTURA SINTÉTICA PARA O MUNICÍPIO DE MARABÁ-PA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia da Universidade Federal do Pará (PPGGRD-UFGPA), como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia.

Área de concentração: Minimização de Riscos e Mitigação de Desastres Naturais na Amazônia

Linha de pesquisa: Vulnerabilidade de Populações em Áreas de Risco.

Data de aprovação: 18 de março de 2025.

Conceito: Aprovado

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **MILENA MARILIA NOGUEIRA DE ANDRADE**
Data: 30/06/2025 16:43:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Milena Marília Nogueira de Andrade – Orientadora
Doutora em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido
Universidade Federal do Pará

Documento assinado digitalmente
 **ALINE MARIA MEIGUINS DE LIMA**
Data: 30/06/2025 10:10:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Aline Maria Meiguins – Examinador interno
Doutora em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido
Universidade Federal do Pará

Documento assinado digitalmente
 **LAURENT POLIDORI**
Data: 30/06/2025 14:42:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Laurent Polidori – Examinador externo
Doutor em Geociências
Universidade Federal do Pará

Documento assinado digitalmente
 **ESTEVÃO JOSE DA SILVA BARBOSA**
Data: 30/06/2025 10:58:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Estevão José da Silva Barbosa – Examinador externo
Doutor em Geografia
Universidade Federal do Pará

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer ao Programa de Pós-Graduação em Gestão de Riscos e Desastres na Amazônia por todo suporte dado durante o mestrado. O apoio foi imprescindível para dar continuidade neste trabalho.

Agradeço especialmente à minha orientadora, Milena, por todas as orientações e aprendizados durante esses dois anos, que me permitiram enxergar o verdadeiro sentido da palavra resiliência. Minha eterna gratidão pela paciência e por todos os ensinamentos, levarei para a vida. Foi uma honra para mim.

Agradeço à minha família por todo apoio de sempre, especialmente aos meus pais, Márcia e Antônio, pela estrutura que me permitem fazer o que faço. Sem vocês nada disso seria possível.

Agradeço à minha companheira de vida, Carolina Sozinho, que me faz enxergar a luz em momentos difíceis. Seu amor, seu caráter e inteligência me incentivam a querer ir ainda mais longe e a ser melhor todos os dias. Obrigado por tudo.

Agradeço aos meus amigos do projeto Deter Amazônia por todo apoio e paciência durante esse período.

Agradeço aos amigos que fiz no PPGGRD, pela troca mútua e sincera de bons momentos e aprendizados durante o curso.

Agradeço a todos os meus amigos, pela paciência testada nesse tempo e por entenderem a demora em responder mensagens. O apoio de todos vocês, foi imprescindível para que eu pudesse seguir nessa caminhada.

Agradeço aos meus parceiros de banda e *gigs* por compreenderem minha ausência dos estúdios e do palco. O apoio de vocês valeu muito.

Agradeço à equipe do PIRD e Cemaden Educação por todo aprendizado durante o estágio obrigatório em São José dos Campos. O trabalho realizado por vocês no Cemaden é inspirador. O meu muito obrigado por tudo, especialmente à Caroline Mourão e Patrícia Matsuo pela troca.

Agradeço ao CNPq por todo suporte científico e financeiro que permitiram a realização deste trabalho.

Agradeço à Universidade Federal do Pará por toda estrutura e suporte técnico cedidos.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta e indiretamente para a realização dessa desafiadora pesquisa.

RESUMO

A região amazônica é caracterizada por sua vasta rede hidrográfica e variabilidade hidrológica, aumentando a susceptibilidade a eventos extremos, como inundações. No município de Marabá, Pará, na confluência dos rios Tocantins e Itacaiúnas, a ocupação irregular das áreas de várzea e a precariedade da infraestrutura urbana, agrava a recorrência de inundações, impactando diretamente a população e os setores econômico e social. Diante desse cenário, esta pesquisa teve como objetivo principal mapear inundações no perímetro urbano de Marabá, utilizando dados de Radar de Abertura Sintética (SAR) do satélite Sentinel-1. A metodologia baseou-se na análise multitemporal de imagens SAR de 2018 a 2023, pré-processadas na plataforma Google Earth Engine. Neste trabalho foram aplicadas técnicas de correção geométrica e radiométrica, além de limiarização adaptativa para a segmentação das áreas inundadas. Os resultados foram validados a partir de dados fluviométricos da Agência Nacional de Águas (ANA) e pluviométricos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os resultados obtidos indicaram que os anos de 2020 e 2022 apresentaram os maiores valores totais de áreas inundadas, atingindo 12,82 km² e 12,52 km², respectivamente. As regiões mais afetadas estão concentradas em áreas de baixa altitude e infraestrutura precária, evidenciando a exposição dos núcleos urbanos do município. Além disso, os resultados estão alinhados com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como: ODS 6 (Água Potável e Saneamento); ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) ao fornecer subsídios para tornar os centros urbanos mais resilientes e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), ao considerar a intensificação dos eventos extremos na região amazônica. Com isso, este trabalho destaca a necessidade de difusão do conhecimento sobre radar, para que essas técnicas contribuam na gestão territorial e na resposta a desastres na Amazônia.

Palavras-chave: desastres; risco; SAR; Google Earth Engine.

ABSTRACT

The Amazon region is characterized by its vast hydrographic network and high hydrological variability, increasing its susceptibility to extreme events such as floods. In the municipality of Marabá, Pará, located at the confluence of the Tocantins and Itacaiúnas rivers, unregulated occupation of floodplain areas and inadequate urban infrastructure exacerbate the recurrence of flooding, directly impacting the population as well as economic and social sectors. Given this scenario, the main objective of this research was to map urban floods in Marabá using Synthetic Aperture Radar (SAR) data from the Sentinel-1 satellite. The methodology was based on a multitemporal analysis of SAR images from 2018 to 2023, pre-processed on the Google Earth Engine platform. Geometric and radiometric corrections were applied, along with adaptive thresholding techniques for flood extent segmentation. The results were validated using hydrological data from the National Water Agency (ANA) and meteorological data from the National Institute of Meteorology (INMET). The findings indicate that 2020 and 2022 recorded the largest total flooded areas, reaching 12.82 km² and 12.52 km², respectively. The most affected regions are concentrated in low-altitude areas with deficient infrastructure, highlighting the exposure of urban centers to flood risks. Additionally, the results align with SDG 6 (Clean Water and Sanitation), SDG 11 (Sustainable Cities and Communities) by providing insights to enhance urban resilience, and SDG 13 (Climate Action) by addressing the intensification of extreme weather events in the Amazon region. This study highlights the need to disseminate knowledge on radar-based flood mapping so that these techniques can effectively contribute to territorial management and disaster response in the Amazon.

Keywords: disasters; risk; SAR; Google Earth Engine.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Relações entre conceito de risco, perigo e desastre	16
Quadro 1 - Tipos de riscos.....	17
Figura 2 - Processo de enchente e inundação	19
Figura 3 - Geometria do sistema SAR.....	24
Figura 4 - Exemplos de dispersão em imagens pré e pós-inundação em Marabá	28
Figura 5 - Exemplos de ruído speckle e filtro Lee	29
Figura 6 - Mapa da área urbana de Marabá.....	30
Figura 7 - Mapa de bairros do Perímetro Urbano de Marabá.....	31
Figura 8 - Mapa da Bacia Hidrográfica do Itacaiúnas e sub-bacias	32
Figura 9 - Mapa Hipsométrico do perímetro urbano.....	33
Figura 10 - Mapa de declividade do perímetro urbano	34
Figura 11 - Mapa Geomorfológico do Perímetro Urbano	36
Figura 12 - Mapa de uso e ocupação do solo do Perímetro Urbano.....	37
Figura 13 - Série histórica da estação fluviométrica Marabá durante 50 anos.....	38
Figura 14 - Padrão fluviométrico durante os meses	38
Figura 15 - Série histórica da estação pluviométrica de Marabá durante 50 anos	39
Quadro 2 - Base de dados oficiais.....	40
Quadro 3 - Características do satélite Sentinel-1	41
Figura 16 - Fluxograma da metodologia	43
Figura 17 - Imagens geradas após o processamento através do GEE	45
Figura 18 - Interface do Google Earth Engine	46
Quadro 4 - Valores totais de inundação em quilômetros quadrados.....	47
Quadro 5 - Valores em quilômetros quadrados de inundação por Núcleo Urbano.....	48
Figura 19 - Mapas de Inundação de 2018 a 2023.....	51
Figura 20 - Mapa de Frequência de inundação de 2018 a 2023	52
Quadro 6 - Valores de frequência de inundação em quilômetros quadrados por Bairros.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CBERS	China-Brazil Earth Resources Satellite
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
ESA	European Space Agency
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ONU	Organização das Nações Unidas
RADAR	Radio Detection And Ranging
SAR	Synthetic Aperture Radar
SGB	Serviço Geológico Brasileiro
SLAR	Side-Looking Airborne Radar
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
WMO	World Meteorological Organization

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	14
2.1	Geral	14
2.2	Específicos	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
3.1	Risco.....	15
3.2	Risco Hidrológico.....	18
3.3	Vulnerabilidade Socioambiental	20
3.4	Uso de Sensores Remotos para Mapeamento de Inundação na Amazônia Brasileira	22
3.4.1	Parâmetros técnicos de imagens SAR.....	23
3.5	Características das Inundações Urbanas	26
4	METODOLOGIA	30
4.1	Área de Estudo e Caracterização Fisiográfica.....	30
4.2	Dados Pluviométricos e Fluviométricos.....	37
4.3	Materiais.....	40
4.4	Método.....	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
6	CONCLUSÕES	57
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICE A – PRODUTOS TÉCNICOS GERADOS A PARTIR DO SCRIPT DE MAPEAMENTO.....	67
	APÊNDICE B – MAPA DE INUNDAÇÃO DO PERÍMETRO URBANO DE MARABÁ, 2018.....	71
	APÊNDICE C – MAPA DE INUNDAÇÃO DO PERÍMETRO URBANO DE MARABÁ, 2019.....	72
	APÊNDICE D – MAPA DE INUNDAÇÃO DO PERÍMETRO URBANO DE MARABÁ, 2020.....	73

APÊNDICE E – MAPA DE INUNDAÇÃO DO PERÍMETRO URBANO DE MARABÁ, 2021.....	74
APÊNDICE F – MAPA DE INUNDAÇÃO DO PERÍMETRO URBANO DE MARABÁ, 2022.....	75
APÊNDICE G – MAPA DE INUNDAÇÃO DO PERÍMETRO URBANO DE MARABÁ, 2023.....	76
APÊNDICE H – MAPA DE FREQUÊNCIA DE INUNDAÇÃO COM PONTOS DE GPS DE 2018 A 2023.....	77
APÊNDICE I – MAPA DE FREQUÊNCIA DE INUNDAÇÃO DE 2018 A 2023.....	78
APÊNDICE J – CÓDIGO PARA MAPEAMENTO ATRAVÉS DO GEE.....	79

1 INTRODUÇÃO

Eventos climáticos extremos relacionados à inundação têm se tornado cada vez mais frequentes no mundo todo e em regiões brasileiras, segundo os relatórios mais recentes do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC). De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2021), estima-se que de 1970 a 2019 os desastres naturais foram responsáveis por 45% de mortes nos últimos 50 anos. No meio urbano estes eventos tendem a ser agravados não apenas pelas características geográficas, mas por ações antrópicas que podem causar danos à vida e perdas materiais, principalmente em áreas mais suscetíveis.

No caso da Amazônia brasileira, grande parte dos desastres naturais está associada a secas e inundações com consequências em áreas urbanas, assim como em cidades pequenas às margens dos rios Amazonas, Tocantins, Tapajós e Xingu (Tomasella *et al.* 2012). Para Szlafsztein (2015), um dos principais desafios que a região amazônica ainda enfrenta é a ineficiência de políticas e estratégias voltadas para a gestão de risco de desastres que considerem as peculiaridades regionais de cada lugar. Vale ressaltar, no entanto, que nos últimos anos um significativo esforço vem sendo empregado no intuito de construir no Brasil práticas mais eficazes de gestão de risco de desastres.

O monitoramento de risco hidrológico é realizado pela Agência Nacional de Águas (ANA), pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) e pelo Serviço Geológico Brasileiro (SGB). Esta última monitora e setoriza áreas de risco no país todo, como forma de dar subsídio para uma gestão eficiente na prevenção de desastres, gestão territorial e difusão do conhecimento. Ao todo, são monitorados pelo SGB 1686 municípios. Só no Pará são 95 municípios que tiveram a setorização de risco elaborada consideradas de alto a muito alto (CPRM, 2023).

Segundo as Nações Unidas (ONU, 2014), o “risco resulta da combinação da probabilidade de ocorrência de um evento com as suas consequências negativas”. O risco corresponde a um sistema complexo de processos, em que a mudança em seu funcionamento pode ocasionar prejuízos diretos e indiretos a uma determinada população (Lourenço, 2007; Andrade, M; Andrade, A; Bezerra, 2017).

Dessa forma, a informação rápida sobre a ocorrência e os impactos das inundações pode ser útil para que governos estaduais e municipais possam atuar imediatamente na resposta de emergência. Logo, a rápida estimativa sobre a extensão espacial das inundações em grandes áreas constitui uma fonte de dados fundamental para a avaliação de desastres e ordenamento do território (Dumitru *et al.*, 2015).

O uso de Sensoriamento Remoto e imagens de satélite desempenham um papel importante no monitoramento e mapeamento de inundação. A detecção, a partir de sensores ópticos, tem sido utilizada para monitorar a dinâmica das inundações com base na baixa reflectância da água nas bandas infravermelhas e na alta reflectância nas faixas do azul/verde (Twele *et al.*, 2016). No entanto, as inundações ocorrem em condições meteorológicas muito adversas de precipitação intensa e alta cobertura de nuvens, o que dificulta a teledetecção óptica de alta qualidade e a detecção de água sob a cobertura vegetal (Pricope, 2013).

Neste sentido, os conjuntos de dados do Radar de Abertura Sintética (SAR) possuem alta resolução espacial e são extremamente úteis na observação das condições de inundação. Isso se deve ao fato de que o SAR emite ativamente ondas eletromagnéticas, as quais não são afetadas pelas condições meteorológicas nem pela hora do dia, portanto, o SAR pode ser utilizado para detectar inundações em áreas com vegetação ou urbanas devido à sua capacidade significativa de penetração (Giustarini *et al.*, 2012).

Com dados disponibilizados gratuitamente pela Agência Espacial Europeia (ESA), o satélite Sentinel-1 compreende dois radares Sentinel-1A e Sentinel-1B que adquirem dados para um volume considerável a nível global (Nagler *et al.*, 2015; Dos Santos *et al.*, 2012). Na região amazônica, dados SAR têm se mostrado altamente eficazes para mapear detalhes do relevo em ambientes sedimentares de baixa altitude, como as planícies de inundação (Cortes; Szlafsztein; Luvizotto, 2020; Souza; Rodrigues, 2020; Andrade; Brabo, 2022).

Historicamente, o município de Marabá enfrenta episódios recorrentes de inundação urbana, amplamente documentados pela comunidade científica. Desde 1926 são registradas ocorrências de inundação em Marabá, tendo o ano de 1980 como o episódio mais grave, onde a cota fluviométrica ultrapassou 18 metros acima do normal, causando perdas econômicas e danos dos mais variados no núcleo de Marabá Pioneira (Bentes, 2018).

A partir da modelagem hidrometeorológica, Santos (2008), identificou que os períodos de enchentes onde há maior amplitude na vazão do Rio Tocantins correspondem aos meses de fevereiro, março e abril, sendo março o mês o mais chuvoso, com valores entre 250 e 400 mm. Segundo Câmara *et al.*, (2016), utilizando modelagem hidrológica multivariada, identificaram que níveis fluviométricos do rio Tocantins, correspondentes aos períodos mais chuvosos do ano, podem chegar até 12 metros.

Apesar do esforço do poder público em parceria com as Defesas Cíveis estadual e municipal, o município ainda enfrenta episódios de inundação relacionados, sobretudo, aos níveis dos rios Tocantins e Itacaiúnas e da ineficiente rede de drenagem urbana durante os períodos mais chuvosos (Raiol, 2010; Chaves, 2011; Cardoso, 2012; Bentes, 2018). A análise

de vulnerabilidade à inundação do município indicou que a área urbana está localizada em áreas que apresentam Alta Vulnerabilidade, tanto no período menos chuvoso quanto no período mais chuvoso, representando cerca de 6,69% (1,011,85 km²) do total do município (Bezerra *et al.*, 2023).

Neste cenário, torna-se crucial disseminar técnicas mais eficazes de Sensoriamento Remoto, a fim de fornecer subsídios aos órgãos responsáveis para adaptação frente a eventos climáticos extremos. Diante disso, esta pesquisa tem como objetivo principal realizar o mapeamento de risco hidrológico associado à inundação no perímetro urbano no município de Marabá utilizando dados de Radar de Abertura Sintética (SAR), como forma de prevenção e resposta a desastres.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar o risco a inundações no perímetro urbano de Marabá – PA, utilizando imagens SAR de 2018 a 2023.

2.2 Específicos

- Realizar cálculo multitemporal e a frequência dos eventos de inundação no perímetro urbano de Marabá;
- Mapear a extensão das inundações em áreas ocupadas;
- Gerar um produto com o *script* de mapeamento via *Google Earth Engine* para identificação de inundações.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Risco

Diante dos impactos ambientais causados pela urbanização, as noções sobre risco passam a ganhar força no ambiente acadêmico, dessa forma, as primeiras discussões sobre risco (*risques*) e incerteza (*incertitude*) se iniciam com Frank Knight e John Maynard Keynes na década de 1920 (Godard *et al.*, 2002).

Os trabalhos pioneiros envolvendo estudos de riscos, trazem nomes como Gilbert F. White, geógrafo norte-americano que inicia sua análise sobre *natural hazards*. White baseou suas pesquisas na ideia de que os perigos naturais são o resultado da interação de forças naturais e sociais, e que os perigos e seus impactos podem ser reduzidos por ajustamentos individuais ou coletivos (Mileti, 1999).

Para Almeida (2012), a noção de risco é um constructo social, ou seja, é uma percepção humana. O autor define que, “risco é a percepção de um indivíduo ou grupo de indivíduos da probabilidade de ocorrência de um evento potencialmente perigoso e causador de danos, cujas consequências são uma função da vulnerabilidade intrínseca desse indivíduo ou grupo.”

Segundo Mendonça (2010), os riscos socioambientais urbanos referem-se a fenômenos resultantes da interação entre contingências naturais e sociais que comprometem as condições de vida nas cidades. Estes riscos evidenciam elementos e fatores de ordem natural (ambiental) e social (cultural, política, econômica e tecnológica).

Eventos catastróficos (*natural hazards*), por exemplo, uma tempestade, chuva torrencial concentrada, desenvolvem-se de forma rápida ao longo do tempo, logo, a parcela da população que apresenta condições de exposição e fragilidade socioambiental é muito mais vulnerável aos impactos e riscos dos fenômenos ligados ao tempo; diferente da classe alta da população, que por sua vez e pelo alto poder econômico e tecnológico, tem a impressão de controlar o tempo e a natureza. Dessa forma, Mendonça (2010) define que as condições de vida da população passam a desempenhar um papel importante na constituição e compreensão dos problemas ambientais urbanos, uma vez que há diferenciações claras sobre o que é cidade formal e cidade informal.

Conforme Grazia e Queiroz (2001), embora a cidade informal não disponha das condições adequadas à vida urbana, ela se mantém acessível às populações de baixa renda, que nela se instalam e desempenham funções importantes na estrutura econômica e social das cidades. A precariedade dessas áreas é agravada por sua localização, frequentemente em zonas suscetíveis a riscos naturais – como enchentes e deslizamentos – e tecnológicos, como contaminações químicas, aumentando significativamente o risco para essas populações.

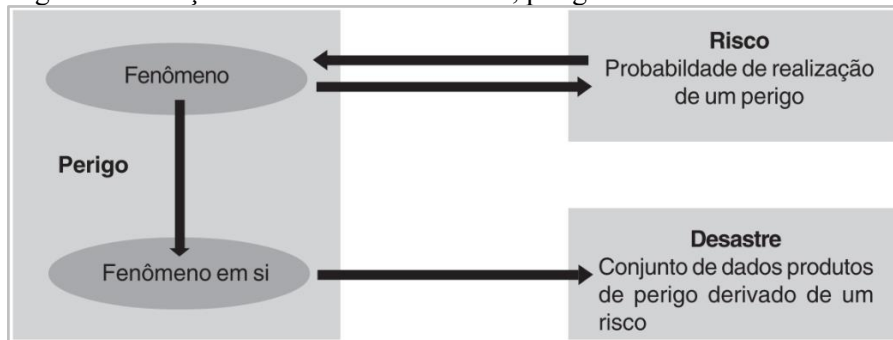
Segundo Santos (1998), as cidades como espaços hegemônicos de produção e troca, de intensa concentração urbana, de acúmulo populacional e complexas infraestruturas, tornam-se espaços onde indivíduos e sociedade encontram-se mais vulneráveis a perdas advindas de processos variados, ou seja, de *espaços de risco*.

Para Gregory (1992), os estudos envolvendo os impactos da ação humana sobre o ambiente, ocorrem devido a três fatores:

- A tendência de análise dos eventos extremos, devido à geração de prejuízos e danos;
- A tendência de realizar a justaposição das investigações do meio físico às da relevância socioeconômica, avaliando o custo em termos de impacto econômico e dos ocasionados pelos *hazards*; e
- A crescente consciência de que havia diferentes percepções de mundo e, conseqüentemente, dos problemas, havendo assim, uma diferença entre a percepção de quem deve tomar as decisões cotidianas (as populações expostas aos *hazards*) e a percepção de quem planeja (Gregory, 1992).

Aneas de Castro (2000), afirma que os perigos antrópicos ou sociais têm sido negligenciados, logo, a percepção adequada das características do perigo é um elemento decisivo na hora de dar respostas a determinados eventos, onde os impactos estão não apenas nos custos provocados por estes, mas também em todas as atividades de vida do grupo. Portanto, para a autora, o risco é a probabilidade de realização de um perigo, enquanto desastre é o resultado de um perigo derivado de um risco, com determinada magnitude. Já o perigo é tanto o fenômeno potencial (quando há existência do risco) quanto o fenômeno em si (Figura 1).

Figura 1 - Relações entre conceito de risco, perigo e desastre



Fonte: Aneas de Castro (2000); Marandola Jr. e Hogan (2004).

Neste sentido, risco pode ser definido como uma categoria de análise associada a priori às noções de incerteza, exposição ao perigo, perdas e prejuízos materiais, econômicos e humanos em função de processos naturais ou associados a ações antrópicas (Castro; Peixoto; Rio, 2005; Egler, 1996). Ainda segundo os autores, o risco pode ser categorizado de diversas formas: risco ambiental, risco social, risco tecnológico, risco natural, risco biológico etc.

Ao levar em consideração os riscos ambientais urbanos, Mendonça (2004), afirma que é essencial reconhecer e distinguir entre as situações eventuais e permanentes. Para o autor, os residentes urbanos estão constantemente expostos aos riscos cotidianos (incêndios, trânsito, poluição) que muitas vezes não são levados em conta, de forma que eventos extremos sim. Neste sentido, é importante definir escalas de gravidade e hierarquizar os riscos constatados ou potenciais, que exigem critérios objetivos, assim como aspectos socioeconômicos que variam de um lugar para o outro (Dubois-Maury; Chaline, 2002). Dessa forma, segundo Veyret (2007) é necessário categorizar os diferentes tipos de riscos percebidos na dimensão espacial, analisadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Tipos de riscos

Tipos de riscos		Definições, características e exemplos
Riscos ambientais	Riscos naturais	Riscos pressentidos, percebidos e suportados por um grupo social ou um indivíduo sujeito à ação possível de um processo físico natural; podem ser de origem litosférica (terremotos, desmoronamentos de solo, erupções vulcânicas), e hidroclimática (ciclones, tempestades, chuvas fortes, inundações, nevascas, chuvas de granizo, secas); apresentam causas físicas que escapam largamente à intervenção humana e são de difícil previsão.
Riscos ambientais	Riscos naturais agravados pelo homem	Resultado de um perigo natural cujo impacto é ampliado pelas atividades humanas e pela ocupação do território: erosão, desertificação, incêndios, poluição, inundações etc.
Riscos tecnológicos		Distinguem-se em poluição crônica (fenômeno perigoso que ocorre de forma recorrente, às vezes lenta e difusa) e poluição acidental (explosões, vazamento de produtos tóxicos, incêndios).
Riscos econômicos, geopolíticos e sociais		Riscos atrelados à divisão e ao acesso a determinados recursos (renováveis ou não), que podem se traduzir em conflitos latentes ou abertos (caso das reservas de petróleo e água); podem ter ainda origem nas relações econômicas na agricultura (insegurança alimentar), causas da globalização (crises econômicas), insegurança e violência em virtude da segregação socioespacial urbana, riscos à saúde (epidemias, fome, poluição, consumo de drogas etc.).
Outros tipos de riscos	Riscos maiores	A compreensão do risco também depende da escala de análise; o risco maior é assim considerado quando o custo de recuperação e o número de perdas humanas são relevantemente elevados para os poderes públicos e seguradores; os riscos maiores correspondem a eventos de baixa frequência e grande magnitude e consequências (ex.: Chernobyl, Seveso, Bhopal, Katrina, etc.); há ainda exemplos de “territorialização” dos riscos, como é o caso específico dos riscos urbanos, em razão da complexidade e da multidimensionalidade de atores e variáveis das cidades.
	Riscos Urbanos	

Fonte: Adaptado de Almeida; Pascoalino (2009) e Veyret (2007).

Portanto, quando a ocorrência de um ou vários eventos gera consequências socioeconômicas (perdas e danos), tem-se um acidente e a possibilidade ou probabilidade de ocorrência de um acidente, por sua vez, constitui um risco (Santos, 2007). Em suma, risco refere-se “à probabilidade de ocorrência de processos no tempo e espaço, não constantes e não determinados, e à maneira como estes afetam - direta ou indiretamente a vida humana como um todo” (Castro; Peixoto; Rio, 2005, p.12).

3.2 Risco Hidrológico

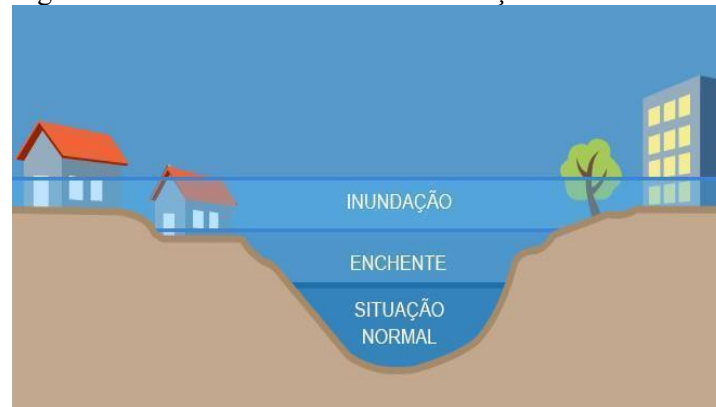
Para Míguez (2017), os riscos hidrológicos englobam inundações, que podem ser graduais ou bruscas, e os alagamentos. Segundo Lourenço e Amaro (2018), riscos hidrológicos podem ser confundidos e tratados na mesma categoria como um só, no entanto, são tecnicamente distintos, podendo ser diferenciados de risco de cheia, risco de inundação e risco de alagamento.

De acordo com Míguez (2017), cheia pode ser definida como o período do ano hidrológico associado à ocorrência de maiores precipitações; alagamentos, por sua vez, são considerados como o acúmulo de água em áreas urbanas por falha do funcionamento do sistema de drenagem.

Apesar dos vários sentidos atribuídos ao termo “eventos extremos”, neste caso abordaremos fenômenos extremos relacionados a tempo e clima, fenômenos estes que influenciam diretamente os níveis dos rios e com desastres envolvendo inundação, logo, fenômenos que ocorrem na atmosfera, como é o caso da precipitação (Duarte; Nóbrega; Coutinho, 2015).

Para o Cemaden (2016), inundação é o processo em que ocorre extravasamento de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas (Figura 2). Logo, o transbordamento ocorre gradualmente em áreas de planície, geralmente causado por chuvas distribuídas e um alto volume acumulado na bacia de contribuição (Cemaden, 2016).

Figura 2 - Processo de enchente e inundação



Fonte: Cemaden (2016).

Em ambientes urbanos, onde há a presença de assentamentos localizados em áreas de planície de inundação e devido ao crescimento espontâneo dos grandes centros, os impactos relacionados a eventos de inundação tendem a ser ainda mais graves. Para Tucci e Bertoni (2003), estes eventos podem ocorrer devido ao comportamento natural dos rios ou intensificados pela interferência antrópica no meio urbano, onde ocorre impermeabilização das superfícies e canalização dos rios.

Para os autores, o intenso processo de urbanização com populações morando em áreas com infraestrutura inadequada, desconsiderou aspectos fundamentais como o controle das cheias urbanas – que causam transtornos e prejuízos para a sociedade e o ambiente, aumentando, consequentemente, a frequência de inundações.

Segundo Christofolletti (1980), a planície de inundação pode ser definida e delimitada por fatores diversos, de acordo com a perspectiva e os objetivos da pesquisa. A planície de inundação, segundo Oliveira (1998), é definida como um importante regulador hidrológico, que absorve o excesso de água nos períodos intensos de chuvas e consequentes cheias. Dessa forma, todo e qualquer rio tem sua área de inundação.

Vale ressaltar que o extravasamento não ocorre de forma homogênea ao longo do canal de drenagem e nem mesmo em suas margens. Christofolletti (1980), define que é na margem côncava que a escavação do leito do rio ocorre, onde é nessa margem que há maior velocidade do fluxo. Em contraponto, o autor também afirma que na margem convexa ocorre deposição em os fluxos apresentam menor velocidade. Dessa forma, na relação diferencial entre as margens é possível observar que a maior parte do transbordamento acontece nas margens côncavas.

Segundo a classificação de Tucci (1999), as inundações ribeirinhas fazem parte da dinâmica natural de um canal de drenagem. Logo, a ocupação, neste caso, não é a causa da

inundação e o acidente ocorre, pois, as áreas naturalmente inundáveis foram ocupadas. Entretanto, em ambientes densamente ocupados, quando a precipitação é intensa e o solo não possui a capacidade de infiltrar, grande parte desse volume escoar para o sistema de drenagem, superando a capacidade natural de escoamento. Logo, o excesso do volume que não é drenado ocupa a várzea, inundando de acordo com a topografia de áreas próximas aos rios. (Tucci; Bertoni, 2003). Segundo Santos (2012), estes eventos podem acontecer de diferentes maneiras em função dos processos climáticos locais e regionais.

Para Santos (2012), a forma geométrica de uma bacia hidrográfica pode definir como ocorrem as inundações, sendo estas indicativas de uma maior ou menor tendência para a ocorrência de inundações. Ainda segundo a autora, de acordo com o fator forma, pode-se definir a predisposição da bacia a inundações utilizando a relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia.

Christofoletti (1980), define outros índices importantes, como o índice de forma que compara a área da bacia com a da figura geométrica, de maneira que esta possa cobrir da melhor forma possível a bacia hidrográfica. Além disso, outro elemento importante a se considerar desta dinâmica, é a densidade de drenagem, onde é possível identificar a velocidade com que a água deixa a bacia hidrográfica. Esse parâmetro é um importante indicativo da permeabilidade relativa do terreno, onde terrenos consideravelmente impermeáveis podem apresentar uma densa rede de drenagem (Jorge; Uehara, 1998).

Outros fatores importantes para compreender a dimensão do processo de inundação, destacam-se a vazão e o escoamento superficial. Para Santos (2012), a vazão pode ser considerada como o volume de água escoado na unidade de tempo, em um determinado curso d'água. Diante do comportamento sazonal da precipitação, a vazão de um rio pode variar ao longo do ano, podendo mudar de ano para ano (Jorge; Uehara, 1998).

Ainda que na literatura acadêmica inundações, enchentes e alagamentos possuam conceitos distintos, estes por sua vez produzem riscos semelhantes em ambientes urbanos, invadindo casas, danificando bens e infraestruturas, paralisa tráfego, serviços públicos e atividades econômicas, gerando a propagação de doenças de veiculação hídrica etc. (Míguez, 2017).

3.3 Vulnerabilidade Socioambiental

A exposição aos riscos ambientais nas cidades torna certas parcelas da população vulneráveis a eventos dessa natureza. Nesse contexto, a vulnerabilidade pode ser compreendida

como a probabilidade de um indivíduo (ou grupo) ser afetado negativamente por um evento natural ou ambiental, ou contaminado por elementos da natureza (Deschamps, 2004).

Dessa forma, vulnerabilidade engloba elementos de exposição ao risco, como as circunstâncias que colocam pessoas e localidades em risco diante de um perigo específico, bem como de propensão, que são as circunstâncias que aumentam ou reduzem a capacidade da população, infraestrutura ou sistemas físicos para responder a e se recuperar de ameaças ambientais (Cutter, 2011; Castro, 1999; PNUD, 2007).

Para as Nações Unidas, o conceito de vulnerabilidade diz respeito às características e condições de determinadas comunidades que as tornam suscetíveis aos efeitos nocivos de desastres (ONU, 2014). Dessa forma, Cutter (2011), define que o grau de vulnerabilidade das comunidades depende, sobretudo, de três fatores: exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa. Para a autora, estes fatores podem ser considerados tanto na antecipação quanto na resposta de um determinado evento.

A exposição identifica a quantidade de pessoas, casas, lotes ou quadras que estão inseridas em locais afetados por inundações. A sensibilidade está relacionada com a capacidade e as condições da população e do local que estão em áreas que sofrem com inundações, além disso, o perfil socioeconômico e o material das casas são relevantes nessa abordagem. Já a capacidade adaptativa tem relação com a habilidade e recursos disponíveis de uma infraestrutura para resistir ou se recuperar dos impactos de desastres naturais. Portanto, quanto maior for a exposição e as pressões que o ambiente esteja sofrendo (ou venha a sofrer), maior será a sua sensibilidade e menor a capacidade de resposta do ambiente (Adger, 2006; Cutter, 2011; Andrade *et al.*, 2017; IPCC, 2022).

A vulnerabilidade social, portanto, é o conceito que pode traduzir a propensão da população para os impactos negativos dos perigos e desastres (Cutter, 2011). A autora afirma que este conceito é capaz de identificar as características de determinada população que aumentam ou diminuem a sua capacidade de preparação para resposta e recuperação diante de algum perigo ou desastre.

Além disso, a vulnerabilidade social ajuda a compreender a espacialização dos riscos e das perdas potenciais, ou seja, a relação existente entre as populações mais vulneráveis e os ambientes naturais vulneráveis, de forma que essa compreensão se torne uma ferramenta na redução de riscos potenciais (Cutter, 2011).

3.4 Uso de Sensores Remotos para Mapeamento de Inundação na Amazônia Brasileira

O termo RADAR é um acrônimo de “*Radio Detection And Ranging*” (Detecção e Medida de Distância por Rádio) que tem sido utilizado para descrever sistemas operando na faixa de frequência de micro-ondas.

O radar é um sensor ativo que emite sinais de energia eletromagnética, que iluminam a superfície ou o alvo desejado e registram a resposta retornada da superfície. Por ser um sensor ativo, os radares independem da luz solar ou de suas condições, podendo operar durante o dia ou à noite (Henderson; Lewis, 1998).

Inicialmente foram desenvolvidos para fins militares durante a Segunda Guerra Mundial, tais sistemas começaram a ser empregados para aplicações civis a partir da década de 70. Após o desenvolvimento dos sistemas aerotransportados *Side-Looking Airborne Radar* (SLAR), ou radares de visada lateral, na década de 1950, eles passaram a ser utilizados no imageamento e reconhecimento militar. Esses sistemas correspondem ao radar de abertura real (RAR) (Freitas, 2024).

O Brasil teve seu primeiro levantamento sistemático da cobertura vegetal na década de 1970, o Projeto Radam, inaugurado em junho de 1971, teve como objetivo principal conhecer a cartografia, vegetação, geologia e solos da Amazônia e do Nordeste brasileiros. Através de um método pouco utilizado na época, o imageamento por radar de visada lateral *Side-Looking Airborne Radar* (SLAR). O projeto proporcionou uma análise detalhada dessas regiões, lançando as bases para estudos subsequentes sobre o meio ambiente e recursos naturais do país (Ferreira, L; Ferreira, N; Ferreira, M., 2008). Em julho de 1975, o mapeamento integrado dos recursos naturais passou a ser de responsabilidade do projeto RadamBrasil, que expandiu o levantamento para o restante do país (Allevato, 1979).

Diante da vasta extensão geográfica da Amazônia brasileira e da complexidade dos ecossistemas, a utilização de sensores remotos tem sido uma ferramenta imprescindível no mapeamento e monitoramento rápido e de baixo custo da diversidade de recursos naturais (Souza-Filho *et al.*, 2006).

Desde 1988, o projeto Prodes realiza o monitoramento de desmatamento por corte raso na Amazônia Legal, utilizando imagens de satélites LANDSAT-5/TM, CBERS-2/2B. Atualmente o projeto utiliza imagens dos satélites ópticos LANDSAT-8/OLI, CBERS-4, CBERS-4A e SENTINEL-2 (Prodes, 2024).

As áreas úmidas (*wetlands*) da região amazônica englobam as extensas planícies de inundação dos rios (várzea) da Amazônia, assim como a zona costeira (Mitsch, 2000). A

planície de inundação do Amazonas, que representa aproximadamente 56% das áreas alagadas do mundo, abrange uma extensão estimada de 300 mil km² (Junk, 1993).

Diante disso, uma variedade de técnicas de processamento digital de imagens de sensores remotos tem sido aplicada e avaliada para o reconhecimento e mapeamento de zonas úmidas amazônicas, que variam desde modelos digitais de elevação, como o SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), sensores ópticos, radares de abertura sintética (SAR) e fusão de dados de sensores remotos (Cohen; Lara, 2003; Novo *et al.*, 1997; Forsberg *et al.*, 2000; Souza-Filho *et al.*, 2003; Costa, 2004; Souza-Filho *et al.*, 2005).

No ambiente costeiro e fluvial, imagens SAR têm sido utilizadas de forma operacional, pois seu imageamento independe das condições atmosféricas, fornecendo importantes dados sobre os cenários dinâmicos associados aos ciclos das marés e descarga fluvial (Souza-Filho *et al.*, 2006).

3.4.1 Parâmetros técnicos de imagens SAR

O uso de dados polarimétricos de radar tem aumentado nos estudos de mapeamento da cobertura terrestre, especialmente em regiões de floresta tropical densa e úmida. Isso ocorre em virtude das dificuldades enfrentadas ao lidar com dados ópticos nessas áreas devido à constante cobertura de nuvens (Nepomuceno, 2003). A transmissão de ondas eletromagnéticas por um meio, neste caso, é diretamente proporcional ao comprimento de onda, dessa forma, quanto menor a frequência do radar maior será a sua penetração no objeto.

No espectro eletromagnético, a região de micro-ondas é comumente utilizada pelos sensores denominados de radar. Estes comprimentos variam de 3 a 75 cm (Lopes; Lima, 2009). Segundo os autores, a interação entre a energia presente nos comprimentos de onda de micro-ondas e a matéria ocorre principalmente de acordo com os princípios do modelo ondulatório. Os comprimentos de ondas mais longos geralmente permitem uma penetração mais profunda no dossel e são menos sensíveis a pequenas variações biofísicas (Henderson; Lewis, 2008).

Nesse contexto, o tamanho da onda em relação à rugosidade das superfícies dos materiais é o parâmetro determinante para as intensidades de reflectância. No caso específico do radar, essa reflectância é chamada de retroespalhamento. Por isso, a imagem de radar fornece uma visão bastante diferente da paisagem em comparação com as imagens do visível ou infravermelho (Meneses, 2004).

A região das micro-ondas é subdividida em bandas espectrais identificadas por letras, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 - Comprimentos de onda e frequência do sensor de radar

Banda	Comprimento de Onda (cm)	Frequência (GHz)
K	0,8 – 1,7	40 – 18,5
X	2,4 – 3,8	12,5 – 8
C	3,8 – 7,5	8 – 4
S	7,5 – 15	4 – 2
L	15 – 30	2 – 1
P	30 – 100	1 – 0,3

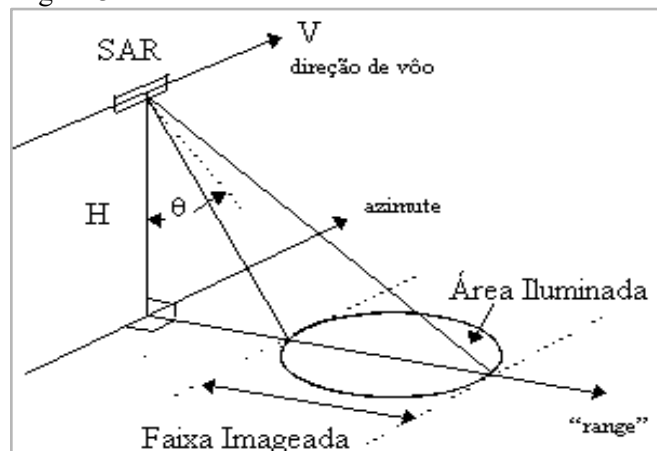
Fonte: Adaptado de Lopes; Lima (2009).

A denominação SAR refere-se a um sistema que emprega uma antena pequena, que por meio de técnicas de registros e de operação e de processamentos são capazes de reproduzir o efeito de uma antena grande.

Como resultado deste modo de operação, a antena produz um feixe estreito e eficaz, sem a necessidade de ter grandes proporções físicas (Lopes; Lima, 2009). Dessa forma, em um sistema de abertura sintética, uma antena com 10 metros é capaz de sintetizar o tamanho de uma antena real de 600 metros (Meneses, 2004).

No sistema de imageamento por Radar de Abertura Sintética (SAR), a plataforma (avião ou satélite) com o sensor SAR se desloca a uma velocidade V em relação ao solo, a uma altura H , apontando a antena lateralmente com um ângulo θ em relação ao nadir (Figura 3). Isso significa que estes sensores visualizam a superfície da Terra de um ponto de vista oblíquo, e o ângulo de incidência pode afetar a resposta geral (Evans, 2013).

Figura 3 - Geometria do sistema SAR



Fonte: INPE (2023).

O ângulo de incidência é a relação entre o feixe de radar de entrada e a superfície. O ângulo pode variar de muito íngreme (20° fora do nadir) a muito raso (60° fora do nadir) (Ulaby

et al., 1981). Em geral, ângulos mais acentuados permitem maior penetração no dossel, enquanto ângulos mais rasos mostram mais componentes da superfície (Costa; Niemann; Novo, 2002).

A radiação eletromagnética (REM) é formada por um campo elétrico e um campo magnético que oscilam e se propagam em planos perpendiculares entre si (Woodhouse *et al.*, 2006; Freitas, 2024). A oscilação do campo elétrico, que apresenta magnitude maior que a do campo magnético, pode ocorrer exclusivamente no plano horizontal ou no plano vertical. Essa vibração restrita a um plano específico é denominada polarização (Freitas, 2024, p. 27).

Os instrumentos SAR da banda C do Sentinel-1 podem operar em polarização única (HH ou VV) e polarização dupla (HH+HV ou VV+VH), implementada através de uma cadeia de transmissão (comutável para H ou V) e duas cadeias de recepção paralelas para polarização H e V (ESA, 2023). Estas polarizações podem destacar atributos específicos de alguns tipos de alvos (Henderson; Lewis, 1998).

Alguns estudos realizados (Chini *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2022; Pelich *et al.*, 2022), indicam que é essencial utilizar tanto a co-polarização (HH ou VV) quanto a polarização cruzada (HV ou VH). Isso se deve ao fato de que diferentes mecanismos de espalhamento, como o espalhamento de múltiplas reflexões (*multi-bounce*), podem ocorrer e dependem da orientação dos edifícios em relação ao sensor SAR (Zhao *et al.*, 2021).

Neste sentido, ainda que cada polarização possa ser utilizada para delimitar manchas de inundação, as características de retroespalhamento do sinal de radar variam, impactando a precisão dos mapas de inundação (Clement; Kilsby; Moore, 2017). Ao mapear inundações urbanas em áreas abertas, por exemplo, a polarização cruzada VH pode oferecer uma vantagem na identificação de inundações em relação às demais ao utilizar a intensidade de dispersores diédricos (Twele *et al.*, 2016). Vale destacar que a fusão de múltiplas polarizações pode reduzir falsos positivos e melhorar a detecção de inundações em ambientes urbanos (Cian; Marconcini; Ceccato, 2018).

Além disso, o Sentinel-1, de acordo com a ESA (2023), opera em quatro modos de aquisição: *Stripmap* (SM); *Interferometric Wide Swath* (IW); *Extra-Wide Swath* (EW) e *Wave* (WV). Para esta pesquisa, utilizou-se o modo IW, que adquire dados com largura de faixa de 250 quilômetros e resolução espacial de 5 a 20 metros, além de possuir polarização única e dupla (ESA, 2024).

3.5 Características das Inundações Urbanas

Os cenários envolvendo inundação urbana podem variar significativamente devido a fatores ambientais distintos e complexos. A densidade das construções, a altura, orientação, vegetação no entorno e a profundidade da água são fatores que exercem influência. (Zhao *et al.*, 2021).

As características do sensor SAR, como a polarização, linha de visada, ângulo de incidência, comprimento de onda e a resolução espacial também podem afetar a maneira como a água de inundação é representada nas imagens SAR. Dessa forma, os fatores supracitados podem interferir significativamente no retroespalhamento SAR (Moreira *et al.*, 2013).

Existem três tipos de dispersão mais comumente discutidos em sensores SAR e que são fundamentais para uma interpretação mais precisa de manchas de inundação, sobretudo em áreas urbanas: espalhamento simples, espalhamento de volume e espalhamento de salto duplo (*double bounce*).

- **Espalhamento simples:**

O espalhamento simples (ou espalhamento de superfície) ocorre quando a energia do radar é refletida ou dispersa a partir de um limite de superfície entre dois meios distintos, porém uniformes. Esse fenômeno é característico de superfícies lisas, como água calma ou solos compactados, onde a maior parte da energia é refletida de volta ao sensor de maneira coerente (Ulaby *et al.*, 2014). Esse mecanismo é particularmente relevante para a detecção de inundações em áreas abertas, onde a superfície da água age como um refletor, proporcionando um sinal de retroespalhamento distinto. No entanto, a presença de estruturas verticais pode alterar esse padrão, introduzindo reflexões múltiplas e aumentando a complexidade de interpretação dos dados (Zhao *et al.*, 2021).

- **Espalhamento de Volume:**

Acontece quando o sinal do radar penetra em um meio heterogêneo e é refletido múltiplas vezes dentro de sua estrutura. Esse mecanismo ocorre em camadas de vegetação, solos porosos, areia seca ou camadas de neve, onde a energia é dispersa em várias direções devido à interação com partículas ou estruturas internas (Richards, 2009). A dispersão de volume é essencialmente importante em áreas com cobertura vegetal, onde a interação do sinal com folhas, galhos e troncos pode mascarar ou alterar a resposta de retroespalhamento da superfície, como em áreas alagadas. Pesquisas recentes têm destacado o uso da polarização

cruzada (HV e VH) para melhorar a identificação da dispersão de volume em ambientes complexos como florestas e áreas urbanas com vegetação (Li *et al.*, 2022).

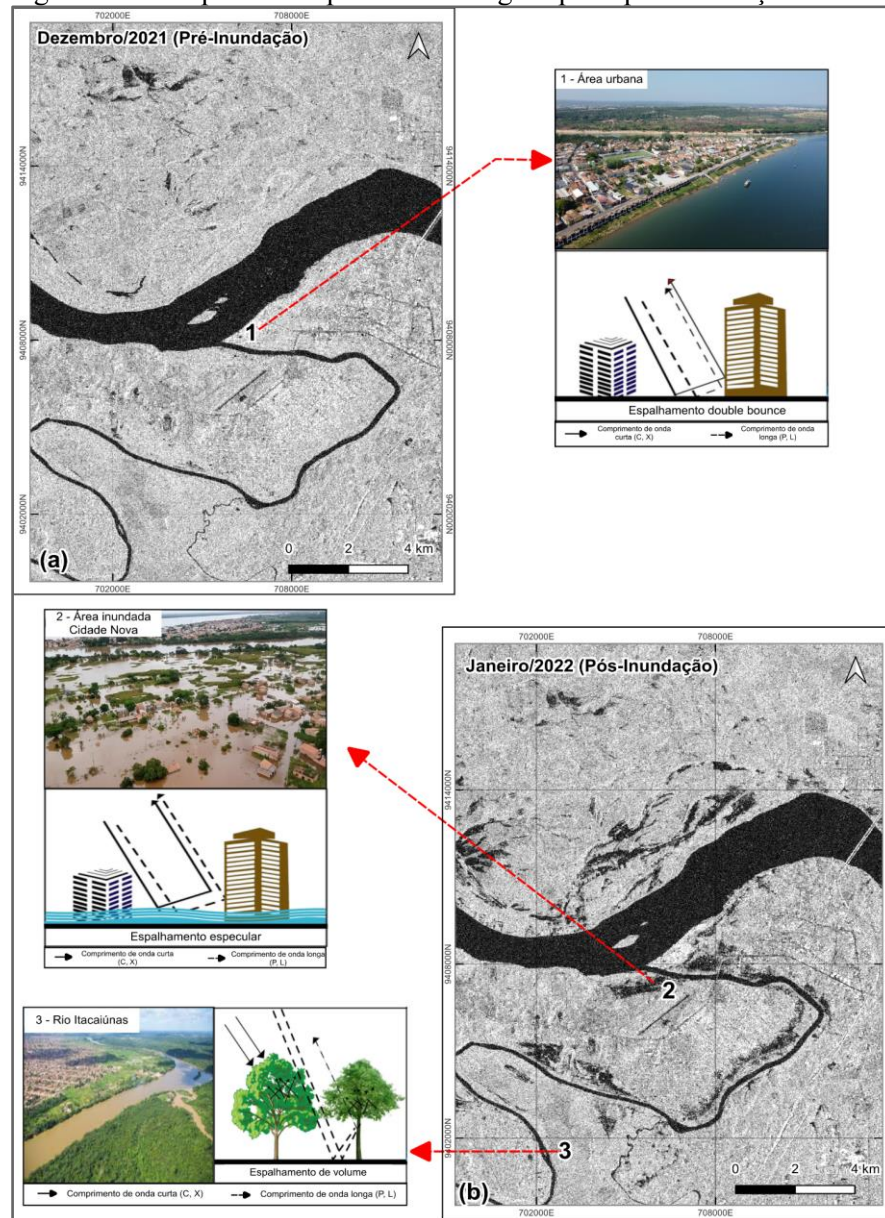
- **Espalhamento *double-bounce* (salto duplo)**

Refere-se à reflexão de energia a partir de alvos com características complexas, como edifícios, pontes ou outras estruturas urbanas. Nestes casos, o sinal pode sofrer múltiplas reflexões (*multi-bounce*), dependendo da geometria e da orientação do alvo em relação ao sensor, resultando em padrões de retroespalhamento mais complexos (Franceschetti; Lanari, 1999). Em ambientes urbanos, a presença de edifícios e infraestrutura pode gerar falsos positivos e dificultar a identificação de áreas alagadas (Schlaffer *et al.*, 2015). Logo, podem ocorrer diversos processos de espalhamento, dependendo da complexidade desse ambiente.

A partir das diferentes respostas observadas em imagens SAR, a água de inundação aberta reflete o sinal na direção especular, produzindo baixos níveis de retroespalhamento e criando áreas escuras na imagem (Figura 4). Também é possível notar que em áreas urbanas com casas, edifícios, demonstram níveis elevados de retroespalhamento e parecem brilhantes devido à dispersão de salto duplo (*double bounce*) que ocorre entre as paredes dessas estruturas e a superfície do solo (Zhao *et al.*, 2021).

A figura 4 demonstra alguns exemplos de dispersão durante episódios de inundações urbanas e como esse sistema pode ser observado em imagens do Sentinel-1 pré e pós-inundação no município de Marabá no ano de 2022. Para realizar o mapeamento de inundações urbanas baseado em dados SAR, é necessário identificar áreas com aumento significativo de intensidade de retroespalhamento (Zhao *et al.*, 2021). Neste caso, para identificar essas alterações, são necessárias imagens pré-inundação e pós-inundação (Kwak *et al.*, 2017).

Figura 4 - Exemplos de dispersão em imagens pré e pós-inundação em Marabá



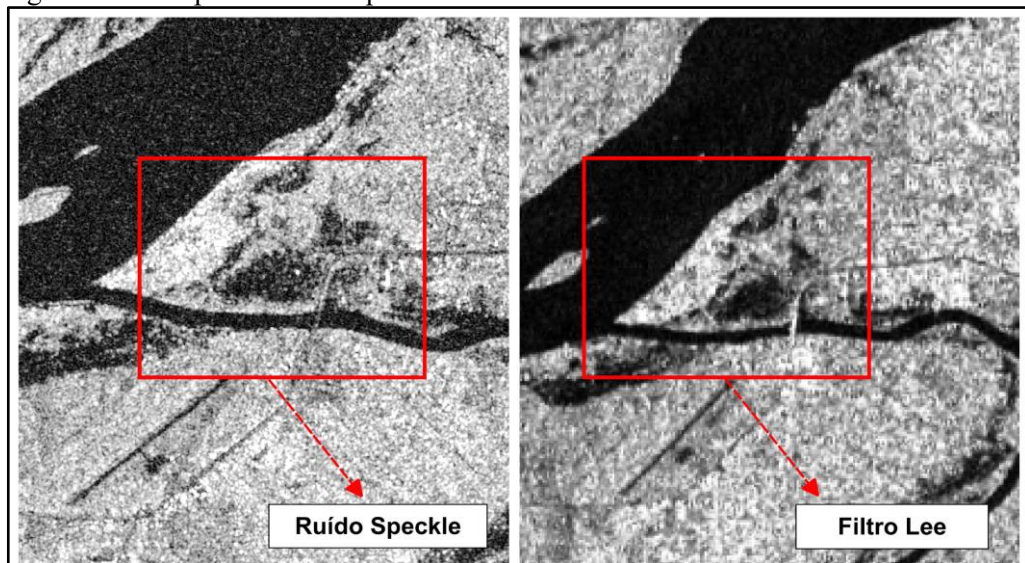
Fonte: Adaptado de Gomathi *et al.* (2019); Miranda (2022); Correio Carajás (2022).

Um dos desafios nesse tipo de abordagem, são as distorções geométricas geradas pelos dados de SAR. As distorções geométricas são inerentes e incomuns observadas em imagens de SAR e resultam do sistema de imageamento de visada lateral (Henderson; Lewis, 1998; Woodhouse *et al.*, 2006; Freitas, 2024).

A inversão de relevo, também conhecida como *lavoyer*, ocorre em áreas com relevo acentuado ou objetos verticais localizados próximos ao nadir do sensor (Freitas, 2024). Nestes casos, o sinal retroespalhado proveniente do topo do objeto ou elevação é registrado pelo sensor antes do sinal retornado pela base (Franceschetti; Lanari, 1999; Richards, 2009)

Um outro fenômeno presente em imagens de radar é conhecido como *speckle* (Figura 5), caracterizado pela presença de manchas de aparência granular que conferem à imagem uma textura rugosa (Woodhouse *et al.*, 2006). Esse ruído surge devido à interferência construtiva e destrutiva das ondas eletromagnéticas retroespalhadas por vários dispersores de forma aleatória dentro de uma única célula de resolução da superfície imageada Meneses *et al.*, 2019; Flores-Anderson *et al.*, 2019). Como cada dispersor reflete a energia emitida pelo radar com fases e intensidades distintas, o sinal resultante apresenta variações que se manifestam com o padrão granular típico do *speckle* (Meneses *et al.*, 2019).

Figura 5 - Exemplos de ruído speckle e filtro Lee



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, algumas abordagens utilizando dados SAR apresentam desafios para o mapeamento de inundações urbanas. No caso dos ruídos observados em imagens de radar, é aplicado o filtro Lee (Lee, 1980), que remove o ruído do *speckle* calculando uma combinação linear do valor central do pixel e o valor médio de pixels vizinhos dentro do kernel em movimento.

Na coleção de dados SAR do satélite Sentinel-1 disponibilizado pela plataforma *Google Earth Engine*, as imagens possuem pré-processamento com remoção de ruído térmico, calibração radiométrica e correção de terreno utilizando modelos digitais de terreno SRTM 30, além de possuir co-polarizações únicas e polarizações cruzadas (ESA, 2024).

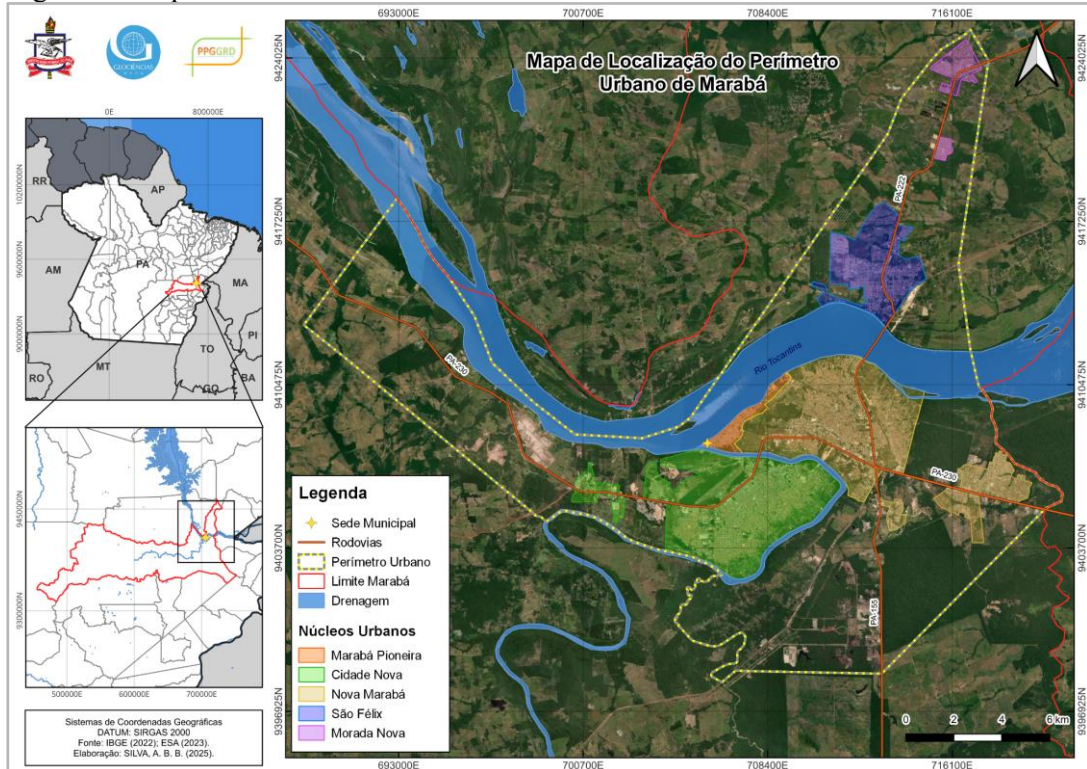
4 METODOLOGIA

4.1 Área de Estudo e Caracterização Fisiográfica

O município de Marabá faz parte da Região Geográfica Imediata (RGI) do sudeste paraense, a aproximadamente 478 km da capital Belém e está situado na confluência de dois principais rios, Tocantins e Itacaiúnas (IBGE, 2017).

De acordo com o Plano Diretor Participativo (2018), é formado por seis núcleos urbanos, sendo eles: Cidade Nova, Industrial, Morada Nova, Nova Marabá, São Félix e Velha Marabá. Segundo o IBGE (2022), o município possui 266.533 habitantes, uma extensão territorial de 15.157,90 km² e área urbanizada de aproximadamente 62,49 km² (Figura 6).

Figura 6 - Mapa da área urbana de Marabá



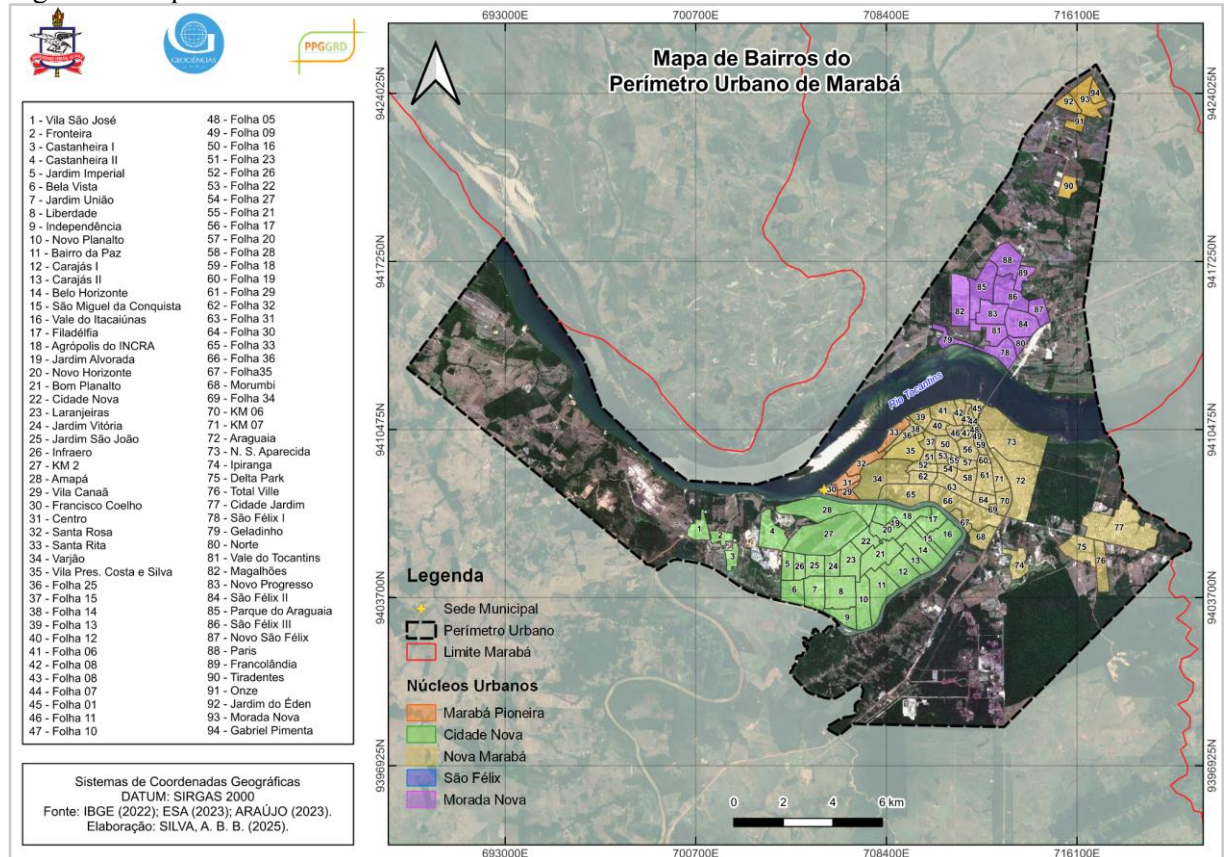
Fonte: Elaborado pelo autor.

O núcleo Cidade Nova é composto por 28 bairros, sendo 16 destes considerados como bairros expostos à inundação, segundo Araújo e Andrade (2024). Os autores definem como expostos, aqueles que estão inseridos na cota topográfica abaixo de 82 metros. Os bairros são: Castanheira I, Independência, Novo Planalto, Filadélfia, Liberdade, Vale do Itacaiúnas, Bairro da Paz, Belo Horizonte, Amapá, Jardim Imperial, Bela Vista, Carajás I, São Miguel da Conquista, Jardim União, Agrópolis do INCRA e Carajás II. Estes bairros em sua maioria estão localizados às margens do Rio Itacaiúnas.

O núcleo Marabá Pioneira possui ao todo 5 bairros, sendo estes Francisco Coelho, Centro, Vila Canaã, Santa Rosa e Santa Rita. Segundo Araújo e Andrade (2024), os 5 bairros estão expostos à inundação. O núcleo Nova Marabá possui ao todo 46 bairros, onde 14 destes são considerados como expostos, sendo eles: Folha 01, Folha 06, Folha 08, Folha 12, Folha 13, Folha 14, Folha 15, Folha 16, Folha 24, Folha 25, Folha 33, Folha 35, Folha 36, Varjão.

O núcleo São Félix, possui 12 bairros, destes 12, Araújo e Andrade (2024) consideram como expostos à inundação, dois: Geladinho e São Félix I. Já o núcleo Morada Nova possui 5 bairros, sendo eles Tiradentes, Onze, Jardim do Éden, Morada Nova e Gabriel Pimenta. De acordo com Araújo e Andrade (2024), nenhum destes foi considerado como expostos devido sua localização topográfica. A Figura 7 exemplifica a localização geográfica de todos os bairros do município e os núcleos dos quais estão inseridos.

Figura 7 - Mapa de bairros do Perímetro Urbano de Marabá



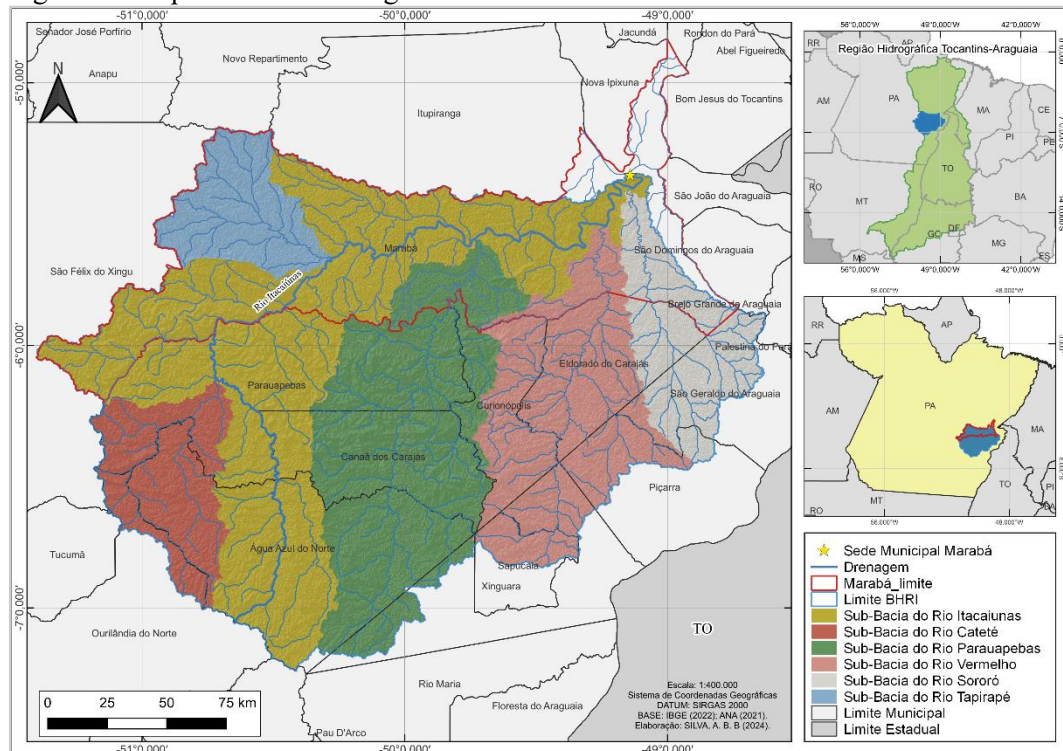
Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a classificação de Koppen-Geiger, o município possui clima tropical chuvoso de monção (Am), com precipitação média anual em torno de 2200 mm e temperatura média do ar de 26°C. A pedologia do município é caracterizada pelas classes de Gleissolo, Neossolo, Latossolo e Argissolo (EMBRAPA, 2011). Além disso, o município está localizado em uma área de planície fluvial, na Depressão Interplanáltica do Araguaia-Tocantins.

Marabá enfrenta inundações devido à sua morfotopografia e à influência direta de dois rios, Itacaiúnas e o Tocantins. Quando essas áreas são ocupadas, caracterizam-se áreas de risco, em terrenos naturalmente sujeitos a alagamentos sazonais, provocados por aumento pluviométrico nas cabeceiras dos rios (BRASIL, 2012).

O município de Marabá é composto por 10 sub-bacias hidrográficas, sendo elas: Aquirí, Cinzento, Tapirapé, Preto, Parauapebas, Vermelho, Sororó, Tauarizinho, Itacaiúnas e Tocantins. Quase toda a extensão municipal está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHRI). Segundo Silva-Júnior (2017), a bacia possui uma área de 42.000 km² e é composta pelas sub-bacias dos rios: Itacaiúnas (19.589 km²), Parauapebas (9.522 km²), Vermelho (7.208 km²), Cateté (3.657 km²), Tapirapé (2.663 km²) e Sororó (Figura 8).

Figura 8 - Mapa da Bacia Hidrográfica do Itacaiúnas e sub-bacias



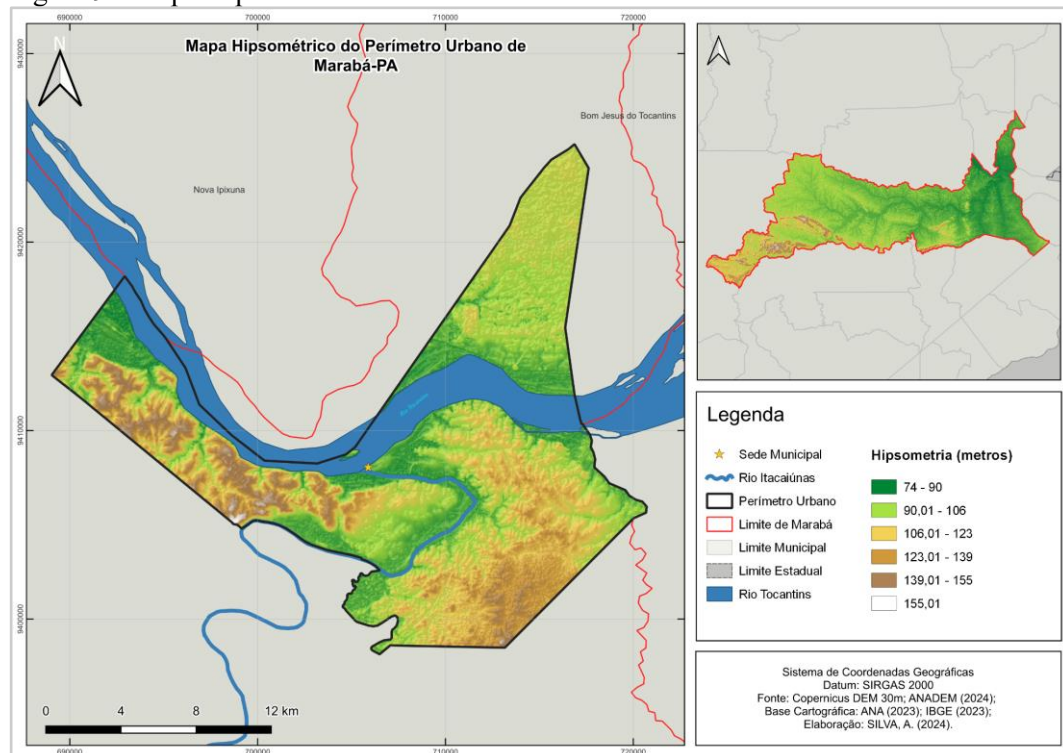
Fonte: Elaborado pelo autor.

A área de estudo representa um sistema complexo onde são encontrados ambientes modificados pela atividade humana, como terraplanagem realizada por técnicas de engenharia para a construção de empreendimentos imobiliários em terrenos inclinados ou em áreas que deveriam ser protegidas permanentemente (APP), agora ocupadas por residências de baixo padrão (Mascarenhas; Vidal, 2015). Para Vidal (2017), esse tipo de ocupação torna o ambiente vulnerável a processos de inundação e alagamento. Botelho (2011) destaca que o crescimento acelerado da população e sua concentração em determinadas regiões intensificam as

intervenções antrópicas sobre as bacias hidrográficas, resultando na alteração do curso natural das águas. Bem como, processos de infiltração ou escoamento superficial, influenciando diretamente a dinâmica hídrica e os padrões de drenagem da bacia.

Os valores observados na análise hipsométrica do perímetro urbano (Figura 9) indicam cinco níveis topográficos: 74m, 106m, 123m, 139m e 155 metros. As menores cotas estão localizadas nas margens dos rios Tocantins e Itacaiúnas.

Figura 9 - Mapa Hipsométrico do Perímetro Urbano

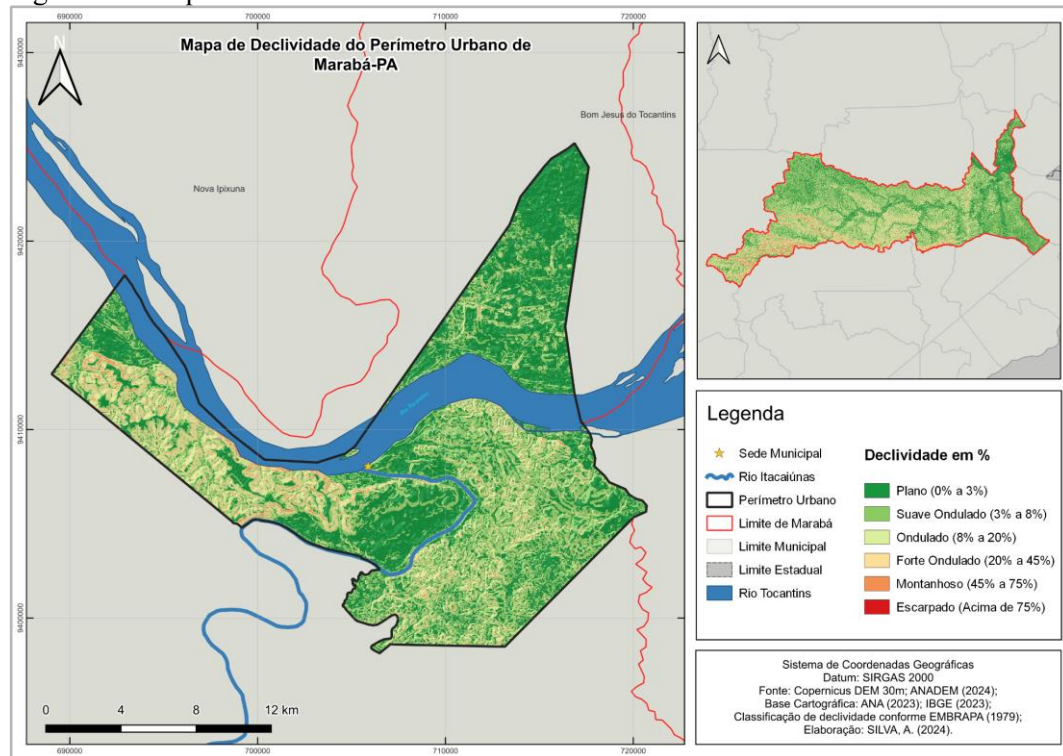


Fonte: Elaborado pelo autor.

O mapa revela que os núcleos urbanos estão inseridos entre as cotas de 74 metros e 123 metros. As maiores altitudes estão localizadas mais a oeste do município onde estão a Floresta Nacional de Carajás, no Parque Nacional dos Campos Ferruginosos.

A partir de dados de altitude do município, é possível identificar quais as áreas do perímetro urbano que possuem maior declividade (Figura 10). Utilizando como base a classificação da Embrapa (1979), a declividade do perímetro urbano indica que as áreas próximas às margens dos rios possuem declividade plana (0% a 3%), acima disso áreas com declividade suave ondulada (3% a 8%), ondulada (8% a 20%), forte ondulada (20% a 45%), montanhosa (45% a 75%) e escarpada (acima 75%).

Figura 10 - Mapa de declividade do Perímetro Urbano



Fonte: Elaborado pelo autor.

As informações de declividade do perímetro urbano demonstram que as planícies fluviais se caracterizam pelas classes de relevo plana (0 a 3%), ou seja, áreas mais suscetíveis a inundações periódicas, com a presença de sedimentos predominantemente aluvionares depositados pelo rio durante o processo de retrabalhamento e transporte sedimentar (Mascarenhas; Vidal, 2015). Ainda segundo os autores, essa característica do relevo possibilita a acumulação de água de chuva, provocando alagamentos constantes em períodos de maior pluviosidade.

Vale destacar que o município adota a cota de 80 metros como a cota de segurança para moradias em planícies fluviais dos rios Tocantins e Itacaiúnas, servindo como base de planejamento de ações rápidas e planos de contingência de inundação da defesa civil do município (GeoMarabá, 2010).

De acordo com a Embrapa (1999), terrenos com declividade plana apresentam pequenos desníveis, a declividade suave ondulada (3 a 8%) é topograficamente pouco movimentada, sendo o perímetro urbano de Marabá constituído por relevos com colinas de declividades suaves. Os conjuntos de colinas com declividade moderada estão representadas por classes onduladas, com as rugosidades sendo representadas por 8 e 20 por cento. Os morros de elevação representados pela classe forte ondulado com a porcentagem entre 20 a 45 por cento.

As unidades geomorfológicas observadas no perímetro urbano revelam áreas extensas de planícies fluviais, caracterizada por uma intensa dinâmica fluvial com aproximadamente 228 metros quadrados, com solos produtivos do ponto de vista da agricultura (Mascarenhas; Vidal, 2015).

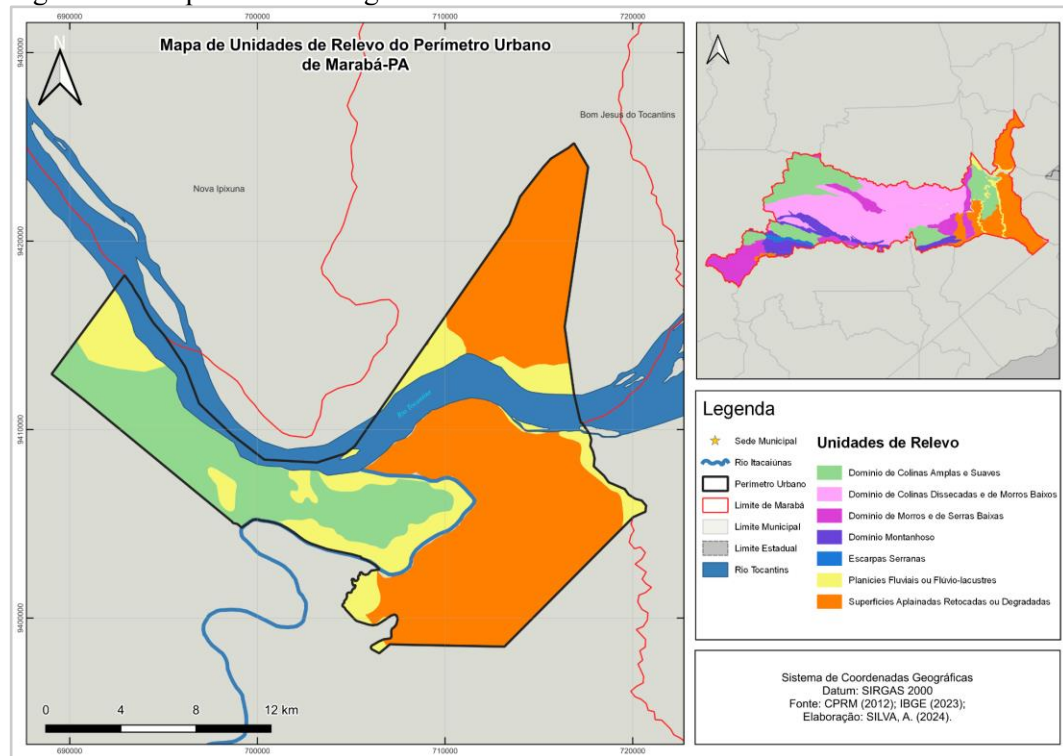
As unidades geomorfológicas (Figura 11) observadas no município são caracterizadas por um conjunto de formas de relevo com características altimétricas e fisionômicas semelhantes. Essas unidades são compostas por diferentes compartimentos geomorfológicos, como planícies, depressões, tabuleiros, chapadas, patamares, planaltos e serras (CPRM, 2012).

De acordo com o IBGE (2009), as Planícies Fluviais são um conjunto de formas de relevo planas ou suavemente onduladas, geralmente localizadas em baixa altitude, onde ocorrem processos de sedimentação e que superam processos de erosão. Estas áreas são resultantes de acumulação fluvial, alagadas periodicamente, comportando meandros abandonados e cordões arenosos.

As Superfícies Aplainadas Retocadas ou Degradadas são unidades de relevo caracterizadas por antigas superfícies de aplainamento que sofreram modificações ao longo do tempo devido à atuação de processos erosivos deposicionais e, em alguns casos, tectônicos. Para o IBGE (2009), essas superfícies representam áreas de transição entre formas de relevo mais elevadas, como planaltos e chapadas, e unidades mais rebaixadas, como depressões e planícies.

Para o IBGE (2009), o Domínio de Colinas Amplas e Suaves corresponde a extensas áreas onde o relevo apresenta formas suavemente onduladas, com topos amplos e vertentes de baixa declividade. Essas unidades de relevo resultam da dissecação moderada de antigas superfícies de aplanamento, sendo modeladas principalmente por processos de erosão e intemperismo químico devido ao clima equatorial úmido (IBGE, 2009). Além disso, os rios destas áreas apresentam cursos meândricos e pouco encaixados, sendo responsáveis pela formação de várzeas e planícies aluviais (IBGE, 2009).

Figura 11 - Mapa Geomorfológico do Perímetro Urbano



Fonte: Elaborado pelo autor.

As áreas ocupadas do perímetro urbano de Marabá, estão localizadas nas unidades de domínio de colinas amplas e suaves, superfícies aplainadas retocadas e em áreas de planícies fluviais. Além disso, é possível observar áreas destinadas à atividade agropecuária na unidade de domínio de colinas e superfícies aplainadas.

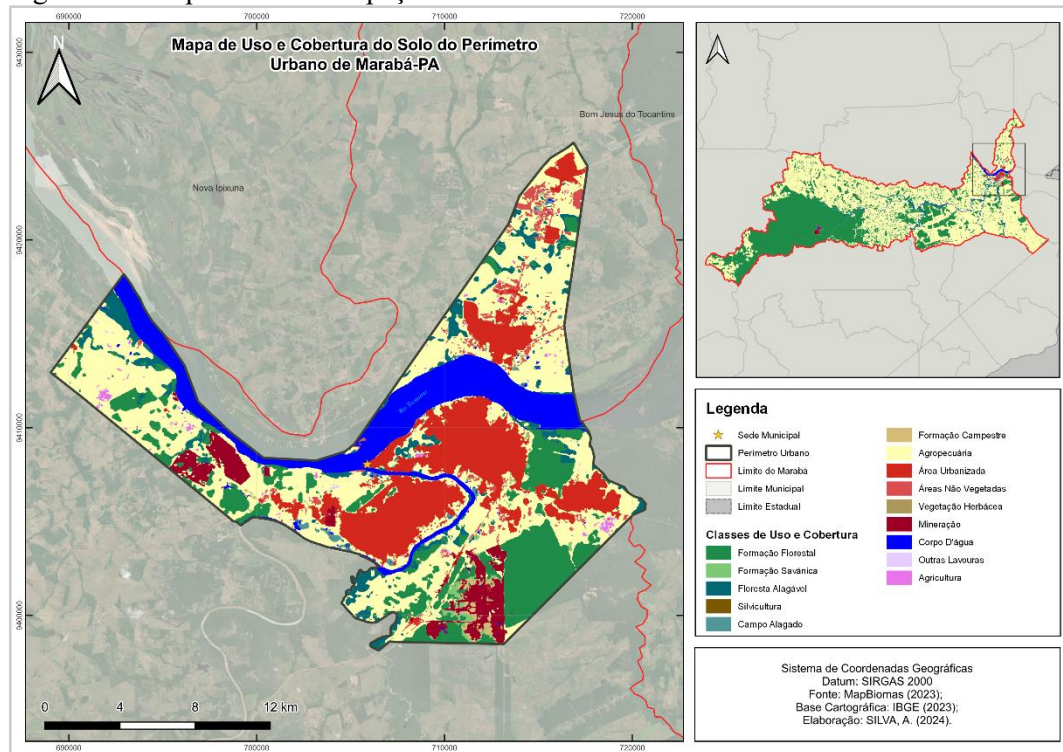
De acordo com dados do Manual técnico de uso da terra do IBGE (1999), o mapa de uso e ocupação da terra do perímetro urbano de Marabá apresenta as seguintes classes em destaque:

- Áreas urbanizadas, consistem em áreas com significativa densidade de edificações e vias, considerando áreas livres de construções e infraestrutura. Nesta categoria, estão incluídas metrópoles, vilas, áreas de rodovias, serviços e transporte, energia, comunicações, cidades, vilas e complexos industriais;
- Agropecuária, composta por atividades humanas, destinadas ao cultivo da terra (agricultura) e à pecuária. Algumas áreas de pastagem natural, podem ser caracterizadas como formações campestres ou campos alagados, submetidas ou não a práticas de pastejo.
- Formação florestal, caracterizada por floresta ombrófila (densa, aberta e mista), floresta estacional (semidecidual e decidual), formações pioneiras (manguezais, restingas e

matas ciliares) e vegetação secundária em diferentes estágios de regeneração após desmatamento.

É possível identificar que há uma intensa concentração populacional às margens dos dois rios principais, em áreas que historicamente apresentam riscos de inundação. O perímetro apresenta uso similar ao do município, com enfoque para atividades de agropecuária e atividades agrícolas, de acordo com dados da coleção 9.0 do MapBiomas (2024).

Figura 12 - Mapa de uso e ocupação do solo do Perímetro Urbano



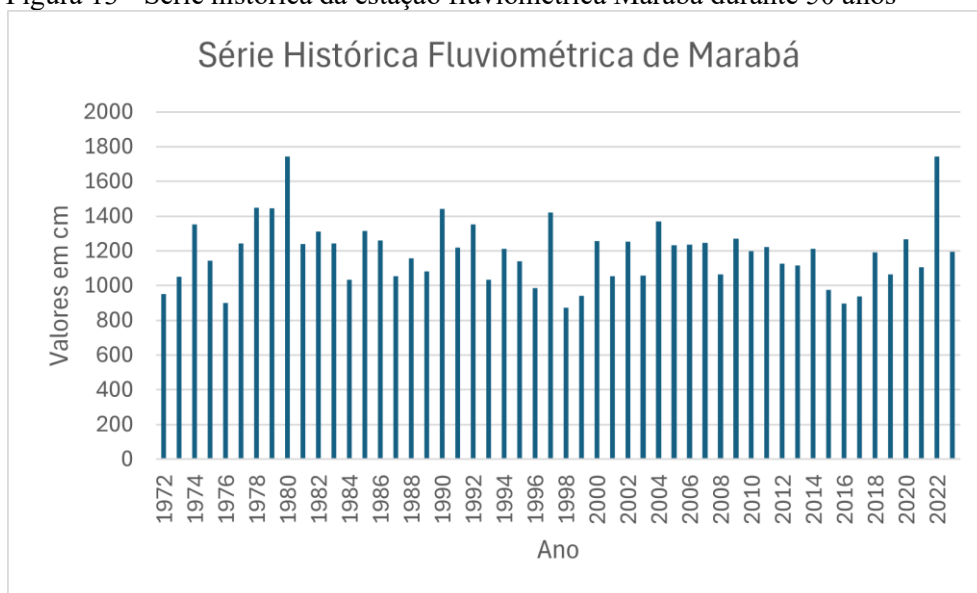
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Dados Pluviométricos e Fluviométricos

A estação fluviométrica, que leva o mesmo nome do município (código 29050000), está localizada à margem direita do Rio Tocantins, próxima ao núcleo urbano Marabá Pioneira e entrou em funcionamento em outubro de 1971 (CPRM, 2022).

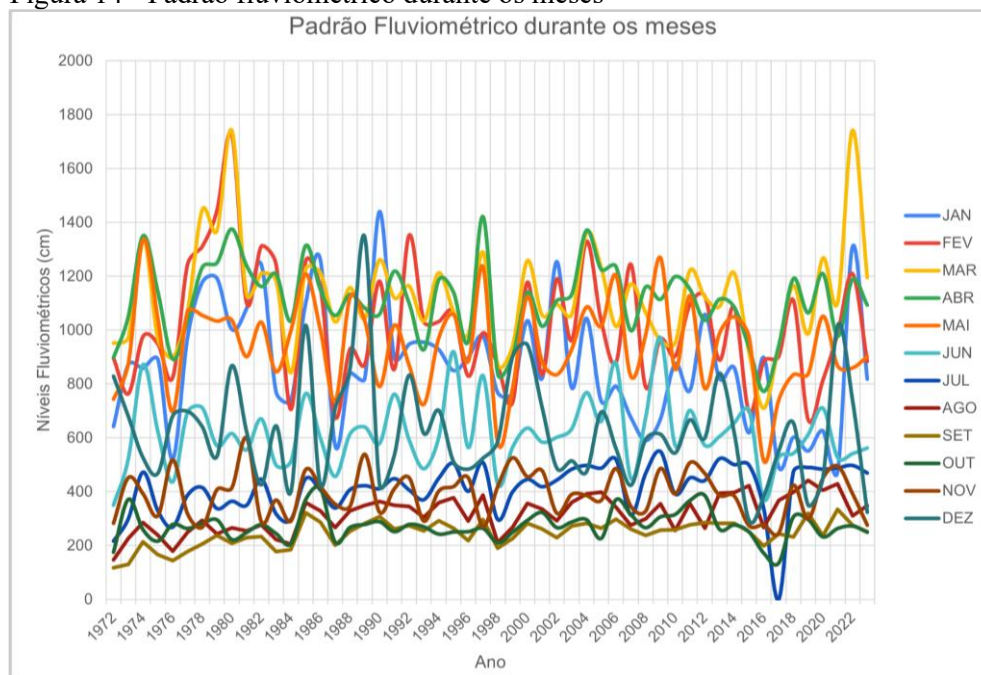
A partir da série histórica de 1972 a 2023, coletada pela ANA, o município apresenta as maiores cotas fluviométricas nos primeiros meses do ano. Estes níveis somados à intensa precipitação no município e à rede deficitária de drenagem urbana, ocasionam episódios frequentes de inundação no município (Figura 13). Vale destacar que em quase toda a série fluviométrica do município, a cota máxima ultrapassou os 10 metros definidos como a cota de alerta pela Defesa Civil. Nos anos de 1980 e 2022, a cota máxima ultrapassou os 17 metros.

Figura 13 - Série histórica da estação fluviométrica Marabá durante 50 anos



Fonte: ANA (2024).

Figura 14 - Padrão fluviométrico durante os meses



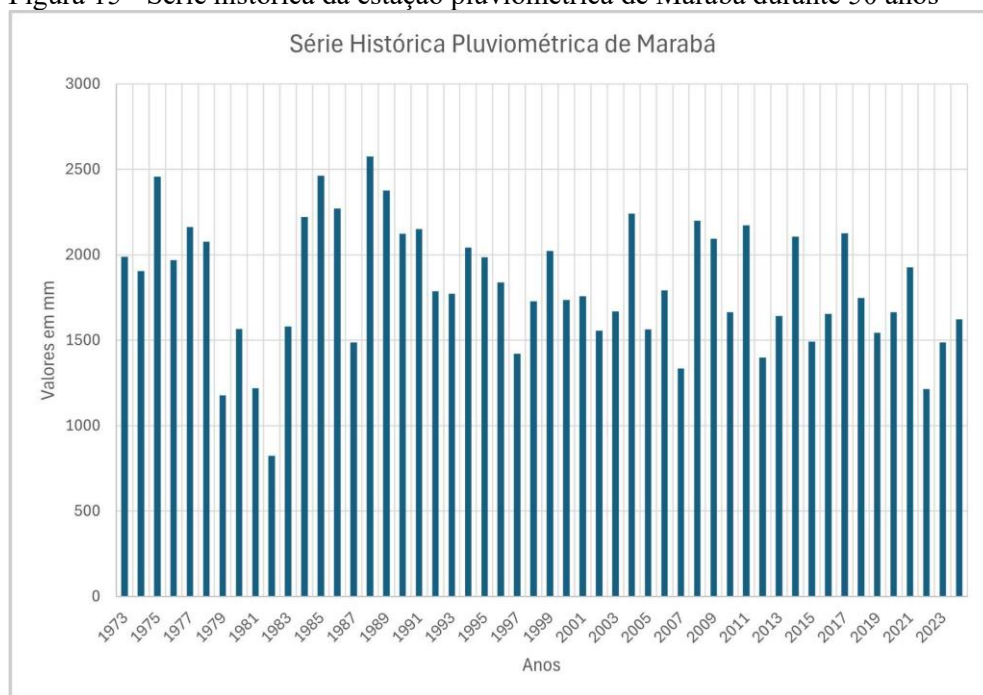
Fonte: ANA (2024).

De acordo com a série histórica fluviométrica do município, os anos em que a cota máxima ultrapassou 14 metros (1978, 1979, 1980, 1990, 1997, 2022), a precipitação registrada nestes anos, segundo o INMET, ultrapassou 1000 mm (INMET, 2024). Os dados fluviométricos refletem o regime de chuvas intenso na região que vai de dezembro a março.

A figura 14 demonstra o comportamento hídrico do Rio Tocantins durante os meses de toda série histórica fluviométrica. É possível identificar que os primeiros meses (janeiro a abril) apresentam as maiores cotas, em sua maioria acima de 1000 cm (ou 10 metros). A partir de maio os níveis diminuem, tendo correlação com o período de estiagem da região amazônica. A partir de dezembro o nível do rio volta a subir, apresentando, portanto, um padrão semelhante em todos os anos da série.

Segundo a estação pluviométrica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), os maiores níveis de chuva observados no município se concentraram nos primeiros meses do ano, janeiro, fevereiro, março e abril tendo seu maior valor no mês de março (Figura 15). Já os menores valores foram de junho a outubro. (INMET, 2024).

Figura 15 - Série histórica da estação pluviométrica de Marabá durante 50 anos



Fonte: INMET (2024).

Em 2006, a cota altimétrica foi criada no município de Marabá, através da Lei Nº. 17.213 de 09 de outubro de 2006, que instituiu o Plano Diretor Participativo do município de Marabá. A cota ficou estabelecida em 84 metros, logo, não sendo permitida áreas edificáveis abaixo desse valor, que corresponde a 12,12 metros acima do nível normal do rio Tocantins (Araújo; Andrade, 2024).

No ano de 2018, através da Lei Nº 17.846 de 29 de março de 2018, realizou-se a revisão do plano diretor de 2006 do município, que passa a considerar para 82 metros a cota altimétrica para áreas não edificadas. Dessa forma, quando a água atingir este nível ou ultrapassar, resultará em episódios de inundação em núcleos urbanos do município (Araújo; Andrade, 2024).

4.3 Materiais

A presente pesquisa realizou um levantamento bibliográfico a partir de artigos, teses, dissertações, notas técnicas e relatórios oficiais relacionados à temática de risco hidrológico e vulnerabilidade socioambiental. Além disso, para elaboração de mapas temáticos, este trabalho utilizará dados vetoriais dos seguintes órgãos oficiais informados no Quadro 2.

Quadro 2 - Base de dados oficiais

Fonte	Informação adquirida	Tipo de dado	Escala
ANA (2019);	Base vetorial Hidrográfica Ottocodificada Nível 4; Dados fluviométricos.	Vetorial	1:250.000
IBGE (2022);	Dados vetoriais estaduais, municipais e de área urbana;	Vetorial	1:250.000
CEMADEN (2023); CPRM (2023).	Delimitação de áreas de risco hidrológico;	Vetorial	1:100.000
INMET	Dados pluviométricos do município (série histórica).	Vetorial	1:100.000
ANADEM/ Copernicus GLO (2024)	Base de dados matriciais para geração de MDT e declividade	Raster	1:25.000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para análise de inundação do município, este trabalho considerou o período de maiores máximas do nível fluviométrico observado pela ANA nos anos de 2018 a 2023. De acordo com dados da ANA (2024), nestes anos a cota fluviométrica ultrapassou os 10 metros que são definidos pela Defesa Civil municipal de Marabá. Para o período selecionado para esta pesquisa, os meses de março e abril apresentaram as maiores máximas do ano, registrando os maiores níveis em 2020 e 2022, com 1742 centímetros (17,42 metros) e 1266 centímetros (12,66 metros), respectivamente.

As menores mínimas se concentraram no segundo semestre, mais especificamente nos meses de setembro e outubro, tendo uma correlação com o regime pluviométrico deste período em que há pouca precipitação (Tabela 2).

Tabela 2 - Maiores máximas e menores mínimas da estação fluviométrica Marabá

Ano	Maior Máx (cm)	Data/Max	Menor Mín (cm)	Data/Mín
2018	1191	13/04/2018	158	21/09/2018
2019	1064	10/04/2019	160	17/10/2019
2020	1266	21/03/2020	170	20/09/2020
2021	1105	24/03/2021	169	14/10/2021
2022	1742	02/03/2022	172	19/10/2022
2023	1194	25/03/2023	188	18/10/2023

Fonte: ANA (2023).

Os dados do satélite Sentinel-1 foram obtidos gratuitamente através da plataforma *Google Earth Engine*. Na coleção de imagens do S1 obtidas, estão incluídas as cenas de nível GRD (*Ground Range Detected*), corrigidas e calibradas por meio de processamento com o Sentinel-1 Toolbox (Quadro 3).

Quadro 3 - Características do satélite Sentinel-1

Satélite	SENTINEL-1
Período	2018; 2019; 2020; 2021; 2022; 2023
Modo de aquisição	IW (<i>Interferometric Wide Swath</i>)
Polarização	VH
Nível	<i>Ground Range Detected</i> (GRD)
Resolução espacial	10 metros
Direção do ângulo da órbita de incidência	Descendente
Comprimento de onda	Banda-C (7,5 cm)
Tempo de revisitação	6 dias

Fonte: ESA (2024).

As imagens Sentinel-1 possuem uma das três resoluções (10, 25 ou 40 metros), quatro combinações de faixas (referentes à polarização de cada cena) e três modos de aquisição. Cada cena contém uma ou duas das quatro bandas de polarização possíveis (GEE, 2024). As combinações polarimétricas possíveis são VV de banda única, HH de banda única, VV+VH de banda dupla e HH+HV de banda dupla:

- VV: copolarização simples, transmissão vertical/recepção vertical;
- HH: copolarização simples, transmissão horizontal/recepção horizontal;
- VV + VH: polarização cruzada de banda dupla, transmissão vertical/recepção horizontal;
- HH + HV: polarização cruzada de banda dupla, transmissão horizontal/recepção vertical.

As imagens Sentinel-1 foram adquiridas no modo *Interferometric Wide Swath* (IW) que possui uma faixa de 250 km e resolução espacial de 5 m por 20 m (espaçamento de pixels de 10m). Foram aplicados, também, dados de elevação do HydroSHEDS que oferece dados hidrográficos em formato padronizado para uso em pesquisas regionais e globais (Lehner *et al.*, 2008). Estes dados de elevação utilizados no HydroSHEDS foram adquiridos pela SRTM e são incluídos na análise através da plataforma *Google Earth Engine*.

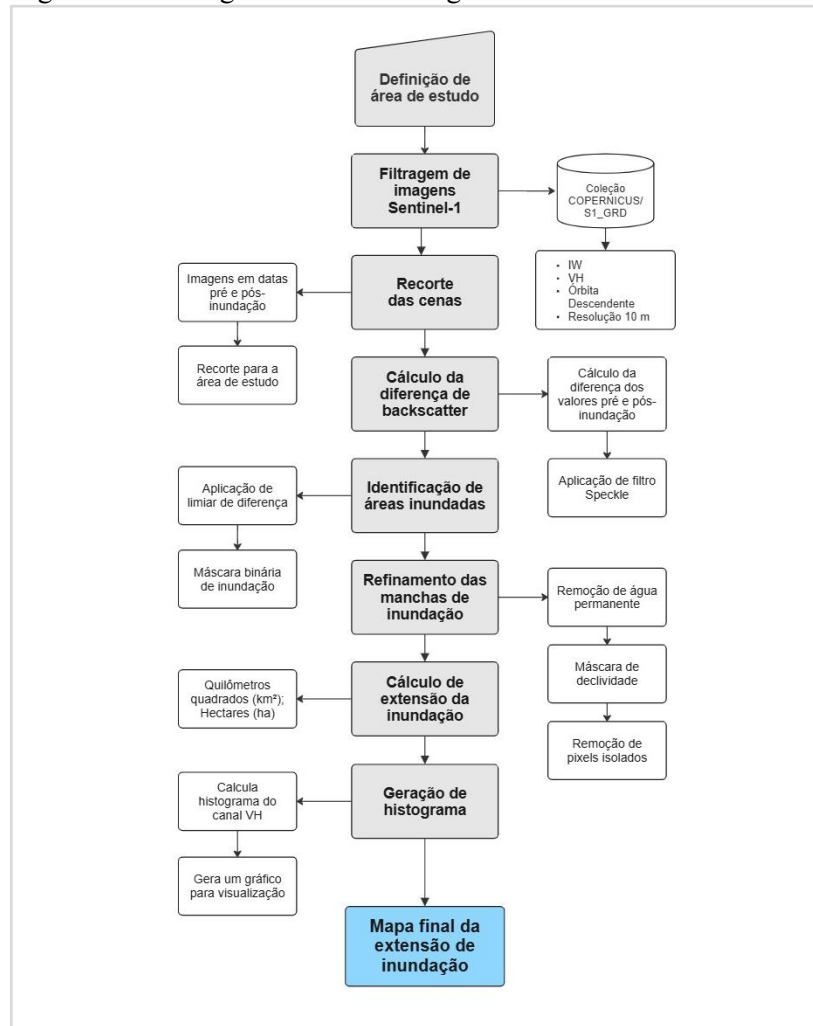
A plataforma *Google Earth Engine* tem se destacado devido ao tempo hábil de processamento em relação a softwares próprios, como por exemplo, *Sentinel Applications Platform* (SNAP), da agência espacial ESA, que processa imagens gratuitamente de radares ópticos e de radar. O pós-processamento da imagem e de dados de inundação obtidos foi realizado no software de mapeamento gratuito QGIS 3.28.

4.4 Método

A metodologia da pesquisa se dividiu no pré-processamento, correção de feições e pós-processamento (Figura 16). A abordagem utilizada baseou-se na detecção de manchas de inundação utilizando dados de radar de abertura sintética (SAR). Técnicas baseadas em SAR para detecção e monitoramento de inundações incluem métodos baseados em limiar, segmentação de imagem, contorno ativo estatístico, classificação baseada em regras e abordagens de fusão de dados.

Entre esses, os métodos baseados em limiar são os mais comumente usados para detecção de inundações. Atualmente, são considerados os métodos mais eficientes e fornecem resultados confiáveis para mapeamento quase em tempo real (Amitrano *et al.*, 2018).

Figura 16 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, é necessário importar a área de interesse, neste caso, o perímetro urbano de Marabá, no formato *shapefile* para a plataforma e em seguida definir o mosaico de imagens para as datas pré e pós-inundação.

Após importar a área de interesse e selecionar as imagens para as datas escolhidas, é necessário incluir alguns procedimentos no *script* para o processamento das imagens, como definir resolução, polarização a ser utilizada, modo de instrumento e passagem da órbita. A coleção do S1 ('COPENICUS/S1_GRD') contém todas as cenas de GRD e são processadas para coeficiente de retroespalhamento (σ°) em decibéis (dB) (GEE, 2024).

O coeficiente de retroespalhamento representa a área de retroespalhamento do alvo por unidade de área do solo. Neste caso, como pode variar em diferentes ordens de magnitude, o coeficiente é convertido em dB como $10 \cdot \log_{10} \sigma^\circ$ (GEE, 2024).

O comportamento da dispersão do terreno vai depender das características físicas do terreno, sobretudo da geometria dos elementos do terreno e das características eletromagnéticas

(GEE, 2024). Para esta pesquisa, utilizou-se as cenas GRD com polarização VH, com órbita descendente, resolução de 10 metros e modo de aquisição IW para a área de interesse.

A detecção de inundações é baseada na diferença entre as imagens SAR para os períodos pré e pós-inundação. Esta diferença permite destacar áreas onde houve forte ou baixa dispersão do sinal de radar (Henry *et al.*, 2006; Twele *et al.*, 2016). O cálculo para identificar a diferença é representado pela seguinte fórmula:

$$Difference = \frac{After}{Before}$$

A utilização da razão, neste caso, para calcular áreas inundadas, é destacada como sendo menos sensível a erros radiométricos tornando a distribuição estatística da imagem dependente somente das mudanças entre as duas aquisições (Chini *et al.*, 2017). Os autores destacam que em ambientes onde o ruído multiplicativo (*speckle*), pode interferir na detecção eficaz de mudanças.

Posteriormente, é aplicada no código a função *focal median* com um raio de 50 metros que ajuda a reduzir ruídos e aprimorar a detecção de inundação (Twele *et al.*, 2016).

Tendo em vista que superfícies alagadas apresentam um baixo retroespalhamento na polarização VH, foi aplicado manualmente um valor de limiar (*threshold*) de 1.30 para todas as imagens analisadas, utilizado para identificar essas regiões (Pulvirenti *et al.*, 2016; Twele *et al.*, 2016). Portanto, a máscara de áreas inundadas foi gerada conforme descrito no código:

$$Flooded = Difference.gt(1.30).rename('water').selfMask()$$

Com isso, para evitar falsos positivos as áreas permanentes de água dos rios Tocantins e Itacaiúnas foram removidas. Para isso, utilizou-se o dataset JRC *Global Surface Water* para esse procedimento (Pekel *et al.*, 2016) considerando as regiões com sazonalidade ≥ 10 meses. Após esta etapa, se fez necessário aplicar um filtro utilizando dados do modelo HydroSHEDS para remover áreas com declividade $> 5^\circ$ que podem atenuar o sinal de radar. Posteriormente, as imagens foram refinadas com remoção de regiões inundadas de pequeno porte (< 10 pixels) por meio de pixels vizinhos, representado pela seguinte fórmula:

$$Connections = Flooded.connectedPixelCount()$$

$$Flooded = Flooded.updateMask(Connections.gt(10))$$

Dessa forma, o filtro somado ao valor de limiar contribui para que não haja excesso de falsos positivos, ou seja, pontos de inundação em áreas que naturalmente não inundam. Outro fator que influencia a presença de falsos positivos é o fato das imagens de radar, ao serem

exportadas em formato GeoTIFF, possuírem distribuição bimodal. Ou seja, a imagem é representada por valores de 0 (não-inundado) e 1 (inundado). Logo, no pós-processamento é necessário excluir pixels com valor 0 para que não interfira no cálculo de área.

Posteriormente, gerou-se o cálculo das áreas inundadas convertendo os pixels identificados como água em área real, utilizando o tamanho do pixel do Sentinel-1 (100 m²/pixel). Dessa forma, para obter valores em hectares e em quilômetros quadrados, aplicou-se a seguinte fórmula:

$$FloodArea(ha) = \frac{FloodArea(m^2)}{10^4}$$

$$FloodArea(km^2) = \frac{FloodArea(ha)}{100}$$

Após o cálculo de área inundada, as imagens pré e pós-inundação foram exportadas em formato *raster*. Para facilitar a utilização e posteriormente o processamento, a mancha de inundação para cada período analisado foi exportada em formato *shapefile*. Este processamento permite a visualização das imagens pré e pós-inundação para todos os anos de pesquisa (Figura 17).

Figura 17 - Imagens geradas após o processamento através do GEE



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, realizou-se o cálculo da área espacial de frequência de inundação para os anos selecionados. Este procedimento foi possível a partir de pontos de GPS (*Global Positioning System*) coletados *in loco* em áreas que já apresentam histórico de alagamento e inundação no município obtidos no trabalho de Araújo e Andrade (2024). Os pontos de controle de campo permitiram a validação da localização das manchas geradas pelo script. Utilizando estes pontos, foi gerado um mapa de frequência de inundação somando imagens binárias dos diferentes anos, a partir da seguinte fórmula:

$$FloodFrequency = \sum_{t=2018}^{2023} FloodExtent_t$$

Onde:

- FloodExtent_t representa a imagem binária de inundação para o ano t .

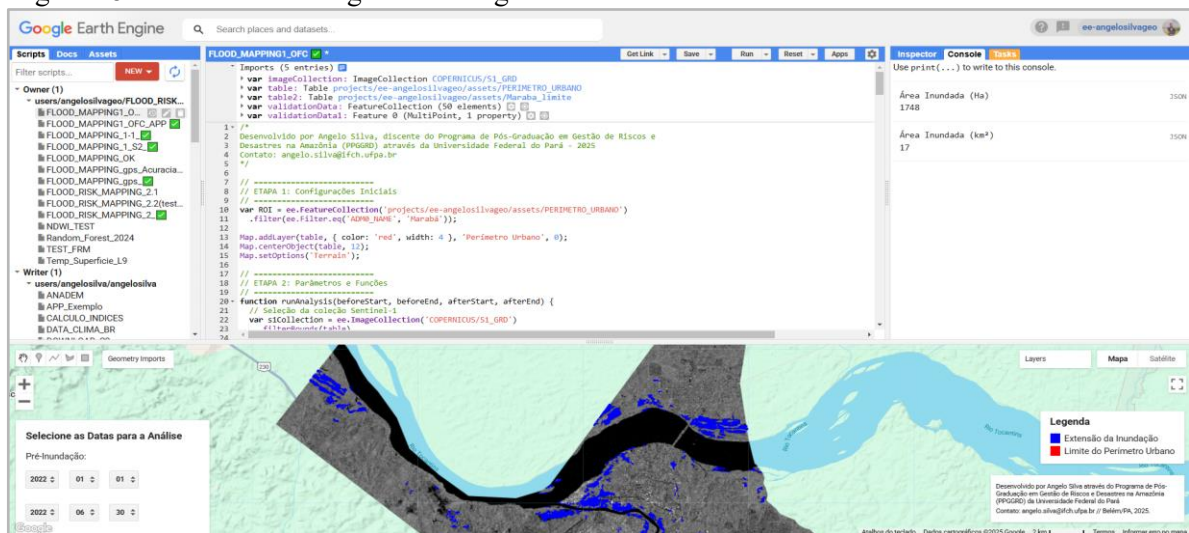
Para analisar os pontos de GPS que estão localizados em áreas de alta recorrência de inundações, foi necessário criar um *threshold* dinâmico, levando em consideração regiões com frequência de inundação maior que 2. Esse procedimento indica que eventos recorrentes de inundação são melhores indicadores de zona de risco (Peker *et al.*, 2016). Neste caso, a máscara de alta frequência de inundação é definida no script a partir da seguinte equação:

$$HighFrequency = FloodFrequency > 2$$

Dessa forma, a equação permite uma imagem onde cada pixel contém um valor entre 0 e 6, representando uma escala de vezes em que a área foi identificada como inundada ao longo dos anos analisados.

Para que fosse possível realizar a mesma análise utilizando estes procedimentos em diferentes anos, foi incluída no *script* uma interface de seleção de datas que permite a escolha de dia, mês e ano, considerando a escolha para períodos pré e pós-inundação do ano selecionado. Na aba ‘Console’ foram informados os valores em hectares e quilômetros quadrados. Na aba *Tasks* foram geradas as extensões para exportação, neste caso das imagens de radar em *raster* e da mancha de inundação em formato *shapefile* para terem seus mapas finalizados no QGIS 3.28.5. (Figura 18).

Figura 18 - Interface do Google Earth Engine



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos através do Sentinel-1 demonstram um padrão de áreas inundadas na maioria dos núcleos urbanos de Marabá, com destaque para os núcleos Cidade Nova, na região de várzea, Marabá Pioneira, na confluência entre os dois rios e em São Félix, na região próxima à margem direita do rio Tocantins. É possível observar que diversos pontos de inundação estão inseridos na planície de inundação do Rio Itacaiúnas (Figura 19).

Dentre os anos selecionados, 2018, 2020 e 2022 apresentaram as maiores áreas totais inundadas, sendo, também, os anos que tiveram as maiores cotas fluviométricas. O ano de 2020 obteve uma área total afetada de 12,82 km², sendo o ano em que o Rio Tocantins obteve a cota máxima de 1268 cm. O ano de 2022 configurou-se como o de maior máxima fluviométrica, e as áreas totais inundadas foram de 12,52 km² (Quadro 4).

Quadro 4 - Valores totais de inundação em quilômetros quadrados para o **Perímetro Urbano** e cotas máximas e mínimas

Ano	Área total em km ²	Cota máx (cm)	Cota mín (cm)
2018	9,58	1191	158
2019	2,7	1064	160
2020	12,82	1266	170
2021	3,20	1105	169
2022	12,52	1742	172
2023	6,24	1194	188

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo o INMET (2022), o mês de março de 2022, que apresenta a maior cota máxima do município, foi marcado pelos maiores acumulados de chuva. De acordo com o órgão, as chuvas tiveram influência direta da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sendo um dos sistemas meteorológicos mais importantes para a Região Norte e norte da Região Nordeste, além de responsável por elevados volumes de chuva (INMET, 2022). De acordo com o Cemaden (2022), as estações hidrológicas disponíveis na região amazônica registraram níveis dos rios acima ou muito acima da média climatológica para o primeiro trimestre de 2022.

Sendo assim, durante o período analisado, observou-se que o núcleo urbano com maior área inundada foi o Núcleo Cidade Nova no ano de 2020 com 6,53 km². Este valor pode ser explicado pelo grande volume de chuvas na região, que ultrapassa os 1700 mm, além da cota máxima de 1266 cm (12,66 metros). Durante todo o período analisado, o núcleo Cidade Nova foi o mais afetado por eventos de inundação (Quadro 5).

A partir da extração de inundação por dados SAR, foi possível compreender a espacialização dos núcleos São Félix e Morada Nova, que apresentaram pouca ou nenhuma área inundada em sua extensão. Os possíveis fatores que podem explicar esse comportamento são a baixa densidade demográfica, a topografia e a baixa declividade, sobretudo, no núcleo Morada Nova que está localizado em uma altitude de 106 metros e um relevo majoritariamente plano.

Quadro 5 - Valores em quilômetros quadrados de inundação por **Núcleo Urbano**

ANO	Marabá Pioneira	Nova Marabá	Cidade Nova	Morada Nova	São Félix	Total
2018	0,05 km ²	1,04 km ²	6,21 km ²	0	0,02 km ²	7,32 km ²
2019	0	0,14 km ²	1,74 km ²	0	0	1,88 km ²
2020	1,39 km ²	2,33 km ²	6,53 km ²	0	0,09 km ²	10,34 km ²
2021	0,32 km ²	0,50 km ²	1,45 km ²	0	0	2,27 km ²
2022	1,44 km ²	2,40 km ²	4,33 km ²	0	0,35 km ²	8,52 km ²
2023	0,53 km ²	0,92 km ²	3,36 km ²	0	0,04 km ²	4,85 km ²

Fonte: Elaborado pelo autor.

As variações espaciais e temporais na extensão das cheias podem ser atribuídas a diversos fatores, como as características da precipitação, as condições topográficas e os tipos de cobertura do solo. Dessa forma, a precipitação desempenha um papel crucial na ocorrência das cheias.

Os valores obtidos pelas estações pluviométricas do INMET e fluviométricos da ANA indicam que o mês de março apresentou os maiores índices de precipitação no município. E os menores valores durante o período de estiagem para o município, neste caso, durante os meses de setembro a novembro.

De acordo com a setorização de risco do CPRM (2012), nestas áreas ocorrem naturalmente o extravasamento das águas, ocasionado principalmente pelo aumento

pluviométrico das cabeceiras e pelo aumento do nível do rio Tocantins, que funciona como uma barragem para o rio Itacaiúnas, segurando as águas e diminuindo o fluxo de água neste.

Segundo Araújo e Andrade (2024), a área urbana do município de Marabá apresenta um total de 6.583 unidades habitacionais expostas ao risco de inundações. Os autores destacam os núcleos de São Félix, com 220 habitações, Nova Marabá com 1.527, Marabá Pioneira com 2.684 e Cidade Nova com 2.152. Estes números representam o alto potencial de risco à inundação nestas áreas.

Os autores destacam que os bairros com maior número de unidades construídas, ruas e avenidas expostas são Santa Rosa (1.398), Francisco Coelho (516) no núcleo Marabá Pioneira, Folha 33 (698) na Nova Marabá e Bairro da Paz (694) na Cidade Nova (Araújo e Andrade, 2024). Além disso, dentre os treze bairros do núcleo, São Félix, Geladinho e São Félix I são os bairros mais expostos à inundação proveniente do Rio Tocantins, totalizando uma área susceptível de 5,15 km². Estes setores estão totais ou parcialmente inseridos em áreas inundáveis, dessa forma, os autores identificaram 37 bairros expostos à ameaça de inundação.

Para Dias *et al.*, (2021), a exposição às inundações também pode ser explicada pela característica física do local. Segundo os autores, o núcleo Marabá Pioneira apresenta relevo plano e suas cotas mínimas observadas estão abaixo de 60 metros e a máxima acima de 70 metros. Os autores também destacam a exposição da Nova Marabá, que apresenta áreas alagadas na Folha 33, Folha 25, Folha 15, Folha 14 e Folha 13. O núcleo Cidade Nova apresenta pontos de inundação no bairro Amapá, Belo Horizonte, Novo Planalto e Independência.

Ao analisar a frequência de inundação por bairros, identificou-se que os bairros que apresentam maiores áreas inundadas em quilômetros quadrados são majoritariamente os que estão em locais próximos às margens dos rios. Araújo e Andrade (2024) ressaltam que as habitações próximas localizadas em níveis mais baixos em relação aos rios, estão abaixo da cota de alerta, configurando-se, portanto, como áreas com maior risco. As habitações localizadas nestas áreas estão mais susceptíveis à ameaça de inundação, podendo resultar em danos materiais significativos, como inundações no interior das residências, danos estruturais e perda de bens pessoais (Araújo e Andrade, 2024).

O município de Marabá apresenta registros históricos de cotas acima do limite desde 1926. Em seu trabalho, Bentes (2018), apresenta a frequência com que as águas do Rio Tocantins ultrapassaram a cota de alerta como sendo acima de 70% ao analisar a série histórica de 1972 a 2015. Dessa forma, o autor destaca que o município possui alta probabilidade de ocorrência de inundação no período de cheia.

A formação socioespacial do município diretamente ligada à dinâmica fluvial dos rios, também cria espaços de segregação, de forma que famílias com melhor condição sofrem menos danos que famílias que vivem em áreas mais susceptíveis (Vidal e Mascarenhas, 2020). Dessa forma, o aparato cartográfico de inundações pode ser considerado como um instrumento de política pública e que está disposto, na Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (Lei Federal Nº 10.257/2012) de maneira que seja incorporado em ações de mapeamento de risco e adaptação do município.

Figura 19 - Mapas de inundação de 2018 a 2023

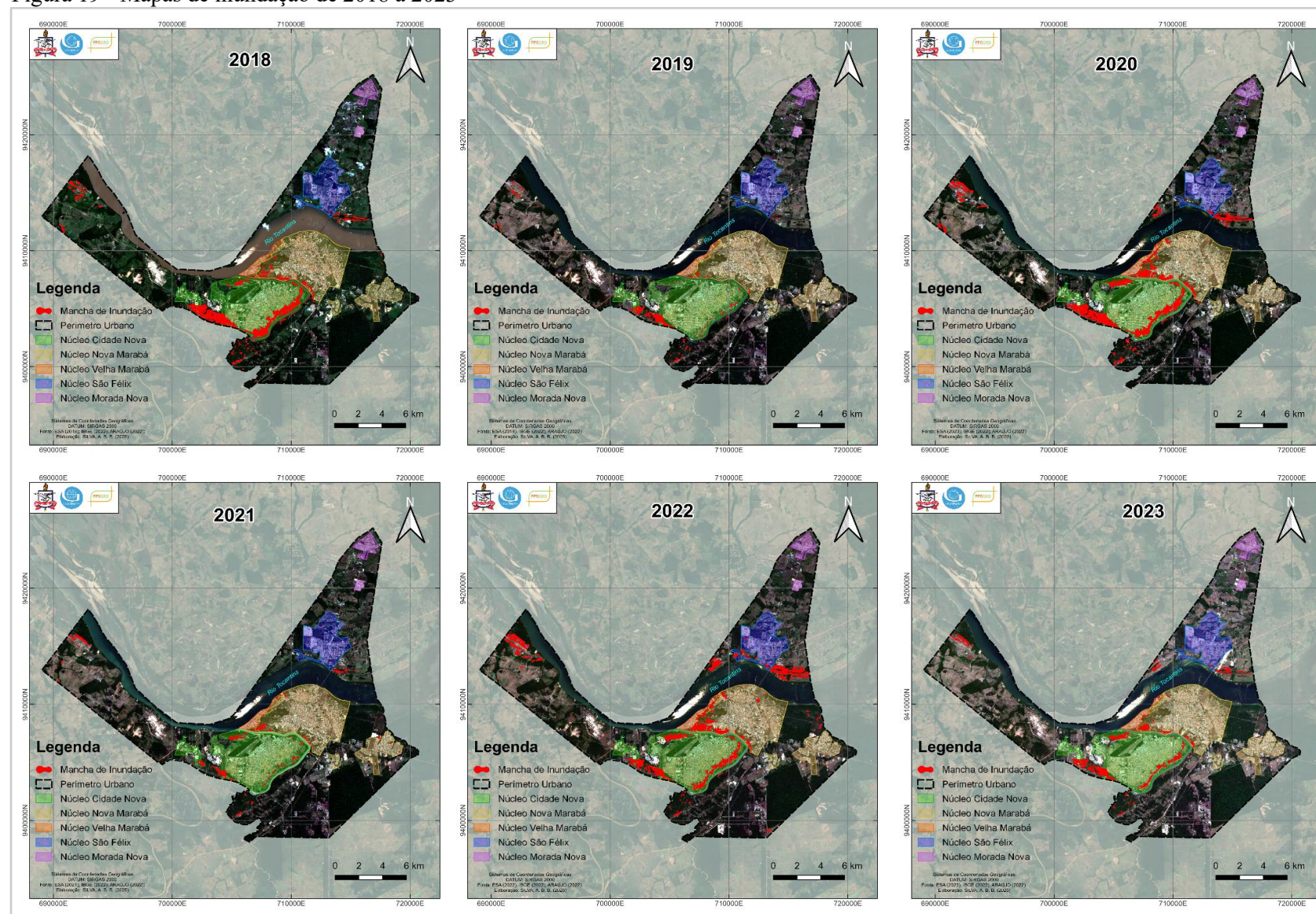
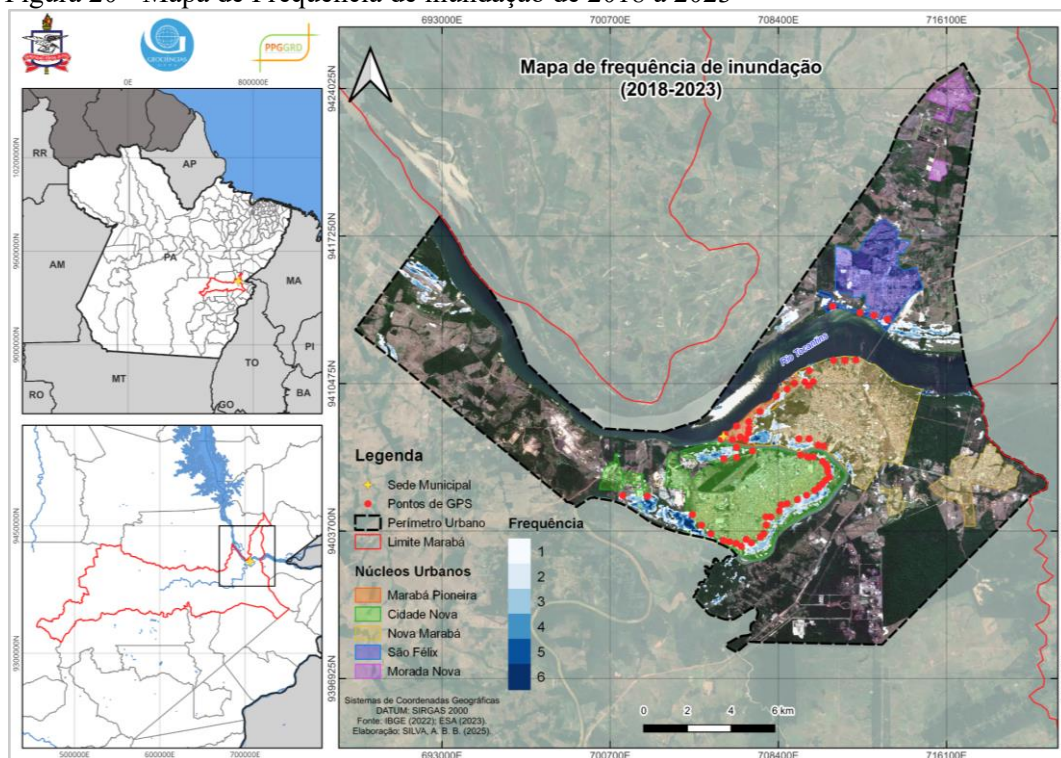


Figura 20 - Mapa de Frequência de inundação de 2018 a 2023



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Figura 20, é possível observar que as áreas frequentemente inundadas se concentraram próximas às margens do rio Itacaiúnas e do rio Tocantins. Sendo possível identificar uma maior frequência e criticidade nos núcleos Cidade Nova, Marabá Pioneira e Nova Marabá. Além disso, ao longo dos anos, na margem direita do rio Tocantins, o núcleo São Félix também apresenta pontos recorrentes de inundação.

Os bairros que apresentaram maiores frequências de inundação, em sua maioria estão inseridos nos núcleos Cidade Nova, Marabá Pioneira e Nova Marabá, que geograficamente estão mais próximos à cota de alerta e baixo relevo das margens dos rios. Vale destacar, que assim como os anos que apresentaram maiores áreas totais inundadas, neste caso 2018, 2020 e 2022, o padrão de frequência também se repetiu nos bairros onde estes apresentaram as maiores áreas nestes anos.

A partir da análise de frequência por núcleos urbanos e bairros, verificou-se a pouca extensão de inundação nos bairros localizados na Marabá Pioneira, mesmo em períodos em que o total inundado se mostrou alto, como em 2020 e 2022. Historicamente, o núcleo apresenta-se como um dos mais afetados por inundações no município (Almeida, 2011). Um dos fatores que pode explicar esse comportamento é causado, sobretudo, pela alta densidade de habitações. Amitrano *et al.*, (2024) explicam que nestas áreas ainda é desafiador mapear inundação, tendo em vista a presença de distorções geométricas e radiométricas. Dessa forma, o espalhamento pode estimar de maneira mais eficaz a

profundidade de inundação quando os edifícios e habitações estão suficientemente isolados. No Quadro 6 estão destacadas as frequências em quilômetros quadrados por bairros dos núcleos afetados por inundação no período analisado. As cores do quadro estão de acordo com as de cada núcleo representado nos mapas anteriores.

Quadro 6 - Valores de frequência de inundação em quilômetros quadrados por Bairros afetados

Núcleos	Bairros	Frequência (km ²)					
		1	2	3	4	5	6
Cidade Nova	Amapá	0,32	0,02	0,81	0,35	0,72	0,55
Cidade Nova	Agrópolis do INCRA	0,06	0,01	0,09	0,02	0,04	0,01
Cidade Nova	Bairro da Paz	0,57	0,07	0,55	0,1	0,36	0,23
Cidade Nova	Bela Vista	0,55	0,36	0,55	0,25	0,33	0,37
Cidade Nova	Belo Horizonte	0,30	0,08	0,34	0,10	0,26	0,20
Cidade Nova	Carajás I	0,52	0,05	0,46	0,07	0,30	0,21
Cidade Nova	Carajás II	0,27	0,01	0,27	0,02	0,21	0,09
Cidade Nova	Jardim União	0,12	0,04	0,11	0,01	0,02	0,01
Cidade Nova	Vale do Itacaiunas	0,27	0,04	0,27	0,06	0,25	0,13
Cidade Nova	Independência	0,37	0	0,35	0	0,11	0,02
Cidade Nova	Novo Planalto	0,40	0,06	0,33	0,03	0,24	0,14
Cidade Nova	São Miguel da Conquista	0,11	0,02	0,12	0,02	0,11	0,08
Cidade Nova	Filadélfia	0,07	0	0,09	0	0,06	0
Marabá Pioneira	Francisco Coelho	0,01	0	0,01	0	0	0
Marabá Pioneira	Vila Canaã	0	0	0,12	0,04	0,13	0,03
Marabá Pioneira	Santa Rosa	0,02	0	0,12	0,02	0,12	0,03
Marabá Pioneira	Santa Rita	0,02	0	0,13	0	0,14	0,03
Nova Marabá	Varjão	0,42	0,05	0,87	0,27	0,89	0,51
Nova Marabá	Folha 13	0	0	0,05	0,02	0,09	0,01
Nova Marabá	Folha 14	0	0	0,05	0,02	0,06	0,02
Nova Marabá	Folha 33	0,24	0,03	0,54	0,04	0,56	0,18
Nova Marabá	Folha 35	0,12	0,04	0,22	0,07	0,15	0,12
Nova Marabá	Folha 36	0,1	0	0,07	0	0,07	0,04
São Félix	São Félix I	0,01	0	0,09	0	0,09	0,03

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD), plataforma do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil que integra produtos sobre desastres além de enviar relatórios sobre ocorrências no Brasil, no período analisado pela pesquisa, foram registrados e reconhecidos em Marabá 13 ocorrências envolvendo inundações e alagamentos. Estes dados são enviados pelas defesas civis municipal e estadual em situações extremas.

Segundo a setorização realizada em 2012 pelo Serviço Geológico Brasileiro no município, as áreas destacadas na figura 17 já apresentavam algum tipo de susceptibilidade a desastres, como erosão, deslizamentos, alagamentos e inundação devido à presença de moradias em áreas rebaixadas. Inúmeras residências estão localizadas em áreas que ocorrem naturalmente o extravasamento da água dos rios.

Estudos envolvendo a extração de manchas de inundação (Peng *et al.*, 2025) combinados com imagens ópticas melhoram consideravelmente a precisão da classificação. Os autores destacam que, embora os métodos de detecção destas mudanças forneçam imagens claras das áreas inundadas, a seleção de limiar deve ser ajustada de acordo com a região afetada, demonstrando certa limitação. Contudo, para esta pesquisa utilizou-se o método de limiarização adaptativa, onde o valor fixo de 1.30 possibilitou a extração de inundação de acordo com o que estava representado nas imagens de radar. Ou seja, houve pouca ou quase nenhuma variação dessa extensão.

Estudos mais recentes (Cian; Marconcini; Ceccato, 2018; Zhao *et al.*, 2021; Singh; Rawat, 2024; Freitas, 2024; Amitrano *et al.*, 2024; Peng, 2025) utilizando Google Earth Engine para detecção de inundação e métodos de limiarização com aprendizado de máquina, chamam a atenção para uma maior acurácia destes métodos. Os resultados obtidos demonstraram-se altamente eficazes na caracterização multi temporal de inundações, sobretudo pela capacidade de utilizar diferentes combinações de técnicas.

Embora técnicas de *machine* e *deep learning* tenham demonstrado eficácia no mapeamento de inundações urbanas utilizando dados SAR, ainda são muitos os desafios para este tipo de abordagem (Zhao *et al.*, 2021). Uma das principais limitações refere-se ao fato de ainda poucos estudos se mostrarem concretos e promissores, além da existência de um conjunto de dados de treinamento não tão abrangentes e diversificados (Zhao *et al.*, 2024). Contudo, os autores apontam que mapeamento não-supervisionado apresenta uma alternativa viável, tendo em vista não necessitar de um conjunto de dados rotulados, ainda que uma alta demanda computacional possa limitar a aplicação deste mapeamento.

Em resumo, as técnicas de limiar que utilizam métodos manuais e automáticos, podem fornecer uma abordagem direta e precisa para seleção de limite, no entanto, está sujeita à interferência a julgamentos subjetivos (Amitrano *et al.*, 2024). Os autores destacam que em áreas onde a inundação é pequena o método manual pode ser mais eficaz, enquanto em mapeamento de inundações em larga escala o método automático pode ser mais benéfico.

Na região amazônica o uso de dados SAR tem se mostrado promissor, sobretudo em regiões que historicamente enfrentam desastres relacionados à inundação. Apesar da limitação de sensores ópticos em condições climáticas não favoráveis, Andrade e Brabo (2022), ao analisar a cidade de Tarauacá, no Acre, durante eventos severos de inundação demonstraram a eficácia da fusão de dados multisensores, neste caso, imagens ópticas como o Sentinel-2 e radar como o Sentinel-1. Com esta fusão, utilizando a polarização VV e limiar abaixo de -13, observou-se uma extensão da cheia de 11,87 km².

Na região do Baixo Rio Amazonas, Pegolo (2024), ao utilizar dados SAR Sentinel-1 e o método empírico de limiarização para extração de superfície de águas abertas o autor identificou uma variação dos valores de dispersão dos pixels ao longo dos anos, devido a dinâmica hidrológica do Rio Amazonas. A partir do método multitemporal os valores de limiar variaram de -17 a -14,4 dB para a polarização VV, de -23,0 dB a -21,7 dB para a polarização VH. Os valores mais altos de limiar para ambas as polarizações coincidiram com o período de cheia do Rio Amazonas, de janeiro a abril. E valores alternados para o período de vazante do rio.

No município de Marabá, ainda são poucos os estudos envolvendo métodos de limiar para análise de inundação com dados SAR. No entanto, algumas pesquisas no campo da geologia (Cunha, 2003; Souza-Filho, 2009; Silva; 2013; Silva, 2015) abordam uso eficaz de dados SAR para identificar feições de forma, como meandros, ilhas fluviais e barras laterais, além de outros corpos d'água como lagos e igarapés. Dessa forma, dados SAR apresentaram uma ampla predisposição para visualizar elementos que compõem o sistema hídrico de Marabá. Dados SAR, integrados com imagens Landsat TM e Aerogeofísica demonstraram sua eficácia na discriminação de unidades litológicas.

Como ferramenta de auxílio para minimizar os impactos das inundações, após uma modelagem espacial multicritério utilizando lógica Fuzzy (Bezerra; Pessoa; Ferreira Filho, 2023), identificou-se que a maior parte de áreas vulneráveis à inundação estão localizadas na área urbana do município de Marabá correspondendo a 1011,69 km². A lógica Fuzzy utilizou as seguintes variáveis: altitude, curvatura, declividade, Índice de

Potência de Fluxo (SPI), Índice de Umidade Topográfica (TWI), distância dos rios, pedologia, precipitação e o uso e cobertura do solo. Dessa forma, o método permitiu analisar as áreas que estão mais suscetíveis em períodos de maior e menor precipitação.

Na porção oriental amazônica, áreas que geograficamente apresentam um padrão de uso distinto, dados SAR e fusão multisensor têm se mostrado eficazes no mapeamento de uso e cobertura da terra. Ao utilizar multipolarização e multifrequência de imagens de radar, Silva *et al.*, (2024), as bandas C e L permitiram uma acurácia satisfatória em diferentes classes de uso, sobretudo para cobertura florestal, cobertura campestre e áreas úmidas.

Diante de variadas ferramentas e métodos eficazes com uso de geoprocessamento e dados SAR, Polidori (2024) alerta para a interpretação errônea destes dados e da interpretação de imagens SAR. O autor destaca a necessidade de conhecimento prévio dos conceitos básicos, como derivação para identificar a frequência de fase do sinal, logaritmos usados para expressar as quantidades de medidas em decibéis, produto escalar usado para definir a localização de um ponto na imagem e números complexos para expressar amplitude e fase medidas pelo radar.

6 CONCLUSÕES

O processamento de imagens SAR representa uma importante etapa para a análise do conjunto de dados, com isso, é possível identificar corpos d'água e áreas úmidas com uma sequência de reflectância de retroespalhamento especular. Conforme demonstrado na metodologia deste trabalho, todo o pré-processamento foi realizado utilizando o GEE. Dessa forma, com as etapas supracitadas, foi possível extrair manchas de inundação e identificar que estas se concentram principalmente no perímetro urbano do município, sobretudo em áreas próximas à margem dos rios Tocantins e Itacaiúnas.

A partir da utilização da polarização VH, observou-se uma baixa reflectância de áreas inundadas, o que indica que há presença de água representadas por manchas escuras. Em contrapartida, foi possível identificar alta reflectância na área ocupada do município, tendo em vista o processo de dispersão *double-bounce*. Esse padrão de retroespalhamento pode significar uma limitação do mapeamento, pois alguns bairros de Marabá sofrem com eventos de alagamentos que se tornam praticamente indetectáveis pela polarização VH.

A análise multitemporal dos dados do satélite Sentinel-1 utilizando limiarização permitiu a identificação de padrões espaciais e temporais das cheias, ao evidenciar a relação entre eventos hidrológicos extremos e a vulnerabilidade socioambiental da região que perdura há décadas. Os resultados obtidos até aqui reforçam o potencial do sensoriamento remoto como uma ferramenta essencial para gestão de riscos e desastres na região amazônica.

Apesar dos avanços tecnológicos e das técnicas de sensoriamento remoto, algumas metodologias ainda apresentam desafios significativos no contexto amazônico. Dentre eles, algumas características geomorfológicas podem gerar falsos positivos e imprecisão na segmentação das áreas alagadas. Nesse contexto, a partir dos resultados promissores obtidos, este trabalho pretende difundir o uso de imagens SAR para detecção rápida e monitoramento de inundações, tendo como principal objetivo um modelo eficiente de resposta para o município de Marabá. A integração e o processamento destes dados com o GEE, possibilita análises multitemporais em larga escala utilizando diferentes sensores.

Como perspectivas futuras, modelos baseados em automação podem ser incluídos na metodologia desta pesquisa de forma que estes possam aprimorar a acurácia das análises a partir de dados SAR. Além disso, ainda que esse método seja repassado em forma de tutoriais e capacitação, pode ser importante considerar transferir a metodologia

de detecção para plataformas WebGis. Logo, tanto órgãos públicos quanto a sociedade civil poderão ter acessos aos dados de forma democrática e mais acessível.

REFERÊNCIAS

- ALLEVATO, S. R. Memória central do projeto Radambrasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 25, p. 31-36, 1979.
- ALMEIDA, L. Q. de; PASCOALINO, Aline. Gestão de risco, desenvolvimento e (meio) ambiente no Brasil—Um estudo de caso sobre os desastres naturais de Santa Catarina. **Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, v. 13, p. 2009, 2009. Acesso em: 14 fev. 2024.
- ALMEIDA, Lutiane Queiroz de. **Riscos ambientais e vulnerabilidades nas cidades brasileiras: conceitos, metodologias e aplicações**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2012. (Coleção PROPG Digital - UNESP). ISBN 9788579832895.
- ALMEIDA, José Jonas de. Os riscos naturais e a história: o caso das enchentes em Marabá (PA). **Tempos históricos**, v. 15, n. 2, p. 205-238, 2011.
- AMITRANO, Donato *et al.* Unsupervised rapid flood mapping using Sentinel-1 GRD SAR images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 56, n. 6, p. 3290-3299, 2018.
- AMITRANO, D.; DI MARTINO, G.; DI SIMONE, A.; IMPERATORE, P. Flood Detection with SAR: A Review of Techniques and Datasets. **Remote Sensing**, v. 16, n. 4, p. 656, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16040656>. Acesso em: 14 fev. 2024.
- ANDRADE, M. M. N. de; BRABO, L. S. Técnicas com multi-sensores para mapeamento de inundação: um estudo de caso na cidade de Tarauacá (Acre, bacia Amazônica, Brasil). **Revista Geonorte**, v. 13, n. 42, p. 90-111, 2022. DOI: 10.21170/geonorte.2022.V.13.N.42.90.111. Disponível em: <https://periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/10517>. Acesso em: 25 jan. 2024.
- ANDRADE, M. M. N. de; ANDRADE, Ádanna de S.; BEZERRA, P. E. S. Índice de vulnerabilidade aos desastres naturais no estado do Pará (Brasil). **Revista Delos**, v. 10, n. 30, 2017. Acesso em: 20 dez. 2024.
- ANDRADE, M. M. N. de; BANDEIRA, I. C. N.; FONSECA, D. D. F.; BEZERRA, P. E. S.; ANDRADE, Á. de S.; OLIVEIRA, R. S. de. Flood Risk Mapping in the Amazon. **InTech**, 2017. DOI: 10.5772/intechopen.68912.
- ANEAS DE CASTRO, S. D. Riesgos y peligros: una visión desde la Geografía. Scripta Nova: **Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales**, Barcelona, n. 60, 15 mar. 2000. Disponível em: <http://www.ub.es/geocrit/sn-60.htm>. Acesso em: 14 fev. 2024.
- ARAÚJO, M.; ANDRADE, M. Inundações e unidades construídas em Marabá: Um estudo de caso na Amazônia brasileira. **Territorium**, v. 31, n. I, p. 43-58, 2024. DOI: 10.14195/1647-7723_31-1_4.
- BENTES, Klebson Loair Lázaro Mansos. **Inundações em Marabá: avaliação estratégica para declarar emergência**. 2018. 61 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11707>. Acesso em: 6 fev. 2024.

BEZERRA, Paulo Eduardo; PESSOA, Francisco; FERREIRA FILHO, David. Modelagem espacial da vulnerabilidade à inundação no município de Marabá-PA via lógica Fuzzy. **Revista Geoaraguaia**, v. 13, n. 2, p. 1–21, 2023. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/15565>. Acesso em: 16 fev. 2024.

BOTELHO, R. G. M. Bacias hidrográficas urbanas. *In*: GUERRA, A. J. T. **Geomorfologia urbana**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011. p. 71-115.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes e movimentos de massa**: Marabá, Pará. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/18336>. Acesso em: 25 jan. 2024.

CÂMARA, R. K. C. *et al.* Modelagem Hidrológica Estocástica Aplicada ao Rio Tocantins para a Cidade de Marabá-PA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 11-23, 2016.

CARDOSO, Renata Kelen. **Previsão estocástica de nível fluviométrico para cidade de Marabá-PA: método de Box-Jenkins**. 2012. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2012. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/2901>. Acesso em: 15 fev. 2024.

CASTRO, Antônio Luiz Coimbra de. **Manual de planejamento em defesa civil**. Brasília, DF: Ministério da Integração Nacional, Secretaria de Defesa Civil, 1999. v. 1.

CASTRO, C. M.; PEIXOTO, M. N. O.; RIO, G. A. P. Riscos ambientais e Geografia: conceituações, abordagens e escalas. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 28, n. 2, p. 11-30, 2005.

CHAVES, Patrícia Malcher. **Estudo observacional sobre os eventos de seca meteorológica e hidrológica na região de Marabá-Pa no Sudeste da Amazônia Oriental**. 2011. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Belém, 2011.

CHINI, M.; HOSTACHE, R.; GIUSTARINI, L.; MATGEN, P. A hierarchical split-based approach for parametric thresholding of SAR images: Flood inundation as a test case. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 55, n. 12, p. 6975–6988, 2017.

CHINI, Marco *et al.* The role of co-and cross-polarizations insar coherences in mapping flooded urban areas. *In*: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM-IGARSS. [S.l.]: IEEE, 2020. **Proceedings[...]** on-line. p. 3255-3258. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9323905>. Acesso em: 15 jan. 2025.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 188 p.

CLEMENT, M. A.; KILSBY, C. G.; MOORE, P. Multi-temporal synthetic aperture radar flood mapping using change detection. **Journal of Flood Risk Management**, v. 11, n. 2, p. 152-168, 2017.

CIAN, F.; MARCONCINI, M.; CECCATO, P. Normalized difference flood index for rapid flood mapping: Taking advantage of EO big data. **Remote Sensing of Environment**, v.209, 712-730, 2018.

COHEN, M. C. L.; LARA, R. J. Temporal changes of mangrove vegetation boundaries in Amazonia: application of GIS and remote sensing techniques. **Wetlands Ecology and Management**, v. 11, n. 4, p. 223–231, 2003.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS-CPRM. **Números de municípios mapeados com áreas de risco no Brasil**. 2024. Disponível em: <https://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Prevencao-de-Desastres/Produtos-por-Estado---Setorizacao-de-Risco-Geologico-5390.html>. Acesso em: 14 fev. 2024.

CORTES, J. P. S.; SZLAFSZTEIN, C. F.; LUVIZOTTO, G. L. Geomorfologia e planejamento ambiental em uma região de conflitos socioambientais na Amazônia Brasileira. **Revista Geociências**, v. 39, n. 3, p. 765-778, 2020.

COSTA, M. P. F.; NIEMANN, O.; NOVO, E.; AHM, F. Biophysical properties and mapping of aquatic vegetation during the hydrological cycle of the Amazon floodplain using JERS-1 and Radarsat. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 7, p. 1401–1426, 2002.

CUTTER, Susan L. A ciência da vulnerabilidade: modelos, métodos e indicadores. **Revista Críticas de Ciências Sociais**, n. 93, p. 59-69, jun. 2011.

CUNHA, E. R. S. P. **Integração digital de imagens de radar e landsat-tm com dados geológicos e aerogamaespectrométricos no auxílio ao mapeamento geológico da região do complexo granítico estrela- Pará (PA)**. Orientador Dr. Athos Ribeiro dos Santos; Orientador: Dr. Waldir Renato Paradella. 2002. 149f. INPE, São José dos Campos, 2002.

DESCHAMPS, M. V. **Vulnerabilidade socioambiental na região metropolitana de Curitiba**. 2004. xviii, 155 [21] f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

DUARTE, Cristiana Coutinho; NÓBREGA, Ranyére Silva; COUTINHO, Roberto Quental. Análise climatológica e dos eventos extremos de chuva no município do Ipojuca, Pernambuco. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 32, n. 2, p. 158-176, 2015.

DUBOIS-MAURY, Jocelyne. Les risques naturels en France, entre réglementation spatiale et solidarité de l'indemnisation. **Annales de Géographie**, v. 111, n. 627, p. 637–651, 2002.

EGLER, Claudio Antonio Gonçalves. Risco ambiental como critério de gestão do território: uma aplicação à Zona Costeira Brasileira. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 58, n. 1, p. 45-60, 1996. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/31762623/risco.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2023.

EUROPEAN SPACE AGENCY. **Sentinel-1 SAR User Guide**. 2024. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides>. Acesso em: 18 dez. 2024.

EVANS, Teresa Lynne. **Habitat mapping of the brazilian pantanal using synthetic aperture radar imagery and object based image analysis**. 2013. 174 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Department Of Geography, University Of Victoria, Victoria, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277589376_Habitat_Mapping_of_the_Brazilian_Pantanal_using_Synthetic_Aperture_Radar_Imagery_and_Object-Based_Image_Analysis_-_Teresa_Evans_MSc_2013. Acesso em: 01 dez. 2024.

FERREIRA, L. G.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, M. E. Sensoriamento remoto da vegetação: evolução e estado-da-arte. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, v. 30, n. 4, p. 379-390, 2008.

FORSBERG, B. R. *et al.* **Tectonic control of wetland distribution in the Amazon basin.** Repositório INPA, 2000. Disponível em: <https://redenorte.ufam.edu.br/Record/oai:repositorio:1-22730>.

FRANCESCHETTI, G.; LANARI, R. **Synthetic Aperture Radar Processing.** CRC Press, 1999. DOI: 10.1201/9780203737484.

FREITAS, C. V. de; **Avaliação da aplicação dos dados do radar de abertura sintética Sentinel-1 para o mapeamento de inundação em áreas urbanas, periurbanas e rurais.** Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, 2024. 94p. Trabalho de Dissertação – [Programa de Pós-Graduação em Geografia], [UFMG], [2024]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/77640>. Acesso em: 15 dez. 2024.

GOMATHI, M. *et al.* Flood inundation mapping for using sentinel-1 SAR data for Assam during 2018. **Res. Rev. J. Space Sci. Technol**, v. 8, p. 16-25, 2019.

GIUSTARINI, L., HOSTACHE, R., MATGEN, P., SCHUMANN, G. J. P., BATES, P. D., & MASON, D. C. (2012). A change detection approach to flood mapping in urban areas using TerraSAR-X. **IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 51(4), 2417-2430.

GRAZIA, G. QUEIROZ, L. L. *et al.* O desafio da sustentabilidade urbana. Rio de Janeiro: FASE/IBASE, 2001. (**Série Cadernos Temáticos**, n.5).

GREGORY, K. J. **A natureza da Geografia Física.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1992. 367p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico de uso da terra**, IBGE: Rio de Janeiro, Brazil, 1999, 58p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico de geomorfologia**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE. (2009).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**, 2ª ed. IBGE: Rio de Janeiro, Brazil, 2012. pp.157-160.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Censo brasileiro de 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

JORGE, F. N.; UEHARA, F. N. Águas de superfície. *In*: OLIVEIRA A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Org.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998, p.101-109.

JUNK, W. J. Wetlands of tropical South America. *In*: WHIGHAM, D. F. *et al.* (eds). **Wetlands of the world: inventory, ecology and management.** Dordrecht: Springer Netherlands. 1993. v.1, p. 679–739.

KWAK, Youngjoo; YUN, Sang-ho; IWAMI, Yoichi. A new approach for rapid urban flood mapping using ALOS-2/PALSAR-2 in 2015 Kinu River Flood, Japan. *In*: 2017 **IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**. [s.l.]: IEEE, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/igarss.2017.8127344>>. Acesso em: 4 fev. 2025.

- LI, Y.; MARTINIS, S.; WIELAND, M. Urban flood mapping with an active self-learning convolutional neural network based on TerraSAR-X intensity and interferometric coherence. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 152, p. 178-191, 2019.
- LI, Y.; MARTINIS, S.; PLANK, S. Urban flood mapping using multi-temporal Sentinel-1 SAR data and machine learning techniques. **Remote Sensing**, v. 14, n. 5, p. 1234, 2022.
- LOPES, G. O.; LIMA, C. A. Características e aplicações das imagens SAR na identificação de alvos na Região Amazônica. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil**, p. 7323-7330pp, 2009.
- LOURENÇO, L. **Riscos naturais, antrópicos e mistos**. Coimbra: Territorium, 2007.
- LOURENÇO, L.; AMARO, A. (2018). **Riscos e Crises: da teoria à plena manifestação**. Imprensa da Universidade de Coimbra. Coimbra University Press, volume 6.
- MARABÁ. Câmara Municipal. **Lei Ordinária Nº 17.213, de 9 de outubro de 2006**. Institui o Plano Diretor Participativo do Município de Marabá, cria o Conselho Gestor do Plano Diretor e dá outras providências. Secretaria de Estado de Integração Regional, Desenvolvimento Urbano e Metropolitano, 2006.
- MASCARENHAS, AL dos S.; VIDAL, Maria Rita. Notas preliminares de geomorfologia urbana e meio ambiente na cidade de Marabá-PA. **Boletim Amazônico de Geografia**, v. 2, 2016.
- MENESES, P. R. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. Universidade de Brasília. Brasília – DF: Departamento de Geociências. Brasília. Texto Universitário. 2004.
- MEYER, F. Spaceborne Synthetic Aperture Radar: Principles, Data Access, and Basic Processing Techniques. *In*: FLORES-ANDERSON, A. I. *et al.* (ed.). **The Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation**. NASA, 2019. p. 21-44. DOI: 10.25966/nr2c-s697.
- MIGUEZ, M.G.; DI GREGÓRIO, L. T.; VERÓL, A.P. **Gestão de Riscos e Desastres Hidrológicos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.
- MILETI, D. S. **Disasters by design: a reassessment of natural hazards in the United States**. Washington: Joseph Henry Press, 1999.
- MITSCH, W. J.; GOSSSELINK, J. G. **Wetlands**. New York: John Wiley & Sons, 2000. 920 p.
- MOREIRA, Alberto *et al.* A tutorial on synthetic aperture radar. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, v. 1, n. 1, p. 6-43, 2013.
- NAGLER, T. *et al.* The Sentinel-1 mission: New opportunities for ice sheet observations. **Remote Sensing**, v. 7, n. 7, p. 9371-9389, 2015.
- NOVO, E. M. L. M.; LEITE, F.A.; AVILA, J.; BALLESTER, M.V.; MELACK, J.M. Assessment of Amazon Floodplain Habitats Using TM/Landsat Data. **Ciência e Cultura**, 49(4): 280-284, 1997.
- OLIVEIRA, L. M. **Guia de prevenção de acidentes geológicos urbanos**. Curitiba: Mineropar, 1998.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Escritos das Nações Unidas para a redução dos riscos de desastres**. 2014. Disponível em: <https://www.un.org/en/>. Acesso em: 15 jan. 2024.

PEKEL, J. F. *et al.* High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. **Nature**, v. 540, p. 418-422, 2016.

PENG, Xiaoran *et al.* Automatic Flood Monitoring Method with SAR and Optical Data Using Google Earth Engine. **Water**, v. 17, n. 2, p. 177, 2025.

PNUD. **Relatório do Desenvolvimento Humano 2007/2008 – Combater as mudanças climáticas: solidariedade humana em um mundo dividido**. Nova York: PNUD, 2007. Disponível em: http://hdr.undp.org/en/media/hdr_20072008_pt_complete.pdf. Acesso em: fev. 2024.

POLIDORI, Laurent. Sensoriamento remoto por radar a nível de pós-graduação no Brasil: desafios e soluções. **Revista Presença Geográfica**, v. 11, n. 1, p. 14-20, 2024.

PRICOPE, Narcisa G. *et al.* The climate-population nexus in the East African Horn: Emerging degradation trends in rangeland and pastoral livelihood zones. **Global Environmental Change**, v. 23, n. 6, p. 1525-1541, 2013.

PRODES — Coordenação-Geral de Observação da Terra. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Acesso em: 14 fev. 2024.

RAIOL, J. de. **A perspectiva para o meio ambiente urbano – Geo Marabá**. Belém: PNUMA, 2010.

ROSS, J.L.S. **Geomorfologia: Ambiente e Planejamento**. São Paulo: Contexto, 1991.

SANTOS, M. 1998. **Técnica, Espaço e Tempo. Globalização e o Meio Técnico-científico Informacional**. São Paulo. Hucitec. 190 p.

SANTOS, J. A. dos. *et al.* Multiscale classification of remote sensing images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 50, n. 10, p. 3764-3775, 2012.

SANTOS, Daniel Meninéa. **Análise e modelagem hidrometeorológica na Bacia do Rio Tocantins em Marabá-PA**. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2008. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/2901>. Acesso em: 15 fev. 2024.

SILVA, Ayara Letícia Bentes da. **Contribuição para a geologia da região SW da folha Marabá, com base na interação aerogeofísica e sensoriamento remoto (radar e tm)**. 2013. 99 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br/jspui/handle/prefix/2116>. Acesso em: 15 de fev. 2024.

SILVA, Raiane Bentes da. **Análise da morfologia dos cordões em terraços e barras estabilizadas na região de Marabá-PA, utilizando imagens SAR/SIPAM**. 2015.

SINGH, Gaurav; RAWAT, Kishan Singh. Mapping flooded areas utilizing Google Earth Engine and open SAR data: a comprehensive approach for disaster response. **Discover Geoscience**, v. 2, n. 1, 2024.

SOUZA, S. V.; RODRIGUES, S. W. P. Dados multi-sensores para reconhecimento e mapeamento de ambientes sedimentares na planície do Rio Amazonas. **Revista Geociências**, v. 39, n. 2, p. 425-436, 2020. DOI: 10.5016/geociencias.v39i2.13500.

SOUZA-FILHO, Pedro W. M.; PARADELLA, Waldir R. Use of synthetic aperture radar for recognition of Coastal Geomorphological Features, land-use assessment and shoreline changes in Bragança coast, Pará, Northern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 75, p. 341-356, 2003.

SOUZA-FILHO, P. W. M. *et al.* Multi-sensor data fusion for geomorphological and environmental sensitivity index mapping in the Amazonian mangrove coast, Brazil. **Journal of Coastal Research**, p. 1592-1596, 2009.

SOUZA-FILHO, P. W. M. *et al.* Sistema de observação costeira e o papel dos sensores remotos no monitoramento da costa Norte Brasileira, Amazônia. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 2, p. 79-86, 2005.

SOUZA-FILHO, P. W. M. *et al.* Sensoriamento remoto e recursos naturais da Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 58, n. 3, p. 37-41, 2006.

SCHLAFFER, S. *et al.* Flood detection from multi-temporal SAR data using harmonic analysis and change detection. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 38, p. 15-24, 2015.

SZLAFSZTEIN, C. F. Management of natural disasters in the Brazilian Amazon region. **Natural Hazards**, v. 76, p. 1745-1757, 2015. DOI: 10.1007/s11069-014-1567-8.

TIEN BUI, D. *et al.* Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. **Landslides**, v. 13, n. 2, p. 361-378, 2015.

TOMASELLA, J. *et al.* The droughts of 1997 and 2005 in Amazonia: floodplain hydrology and its potential ecological and human impacts. **Climatic Change**, v. 116, n. 3-4, p. 723-746, 2012.

TUCCI, C. E. M. Drenagem Urbana e Controle de Inundações. *In*: CAMPOS, Heraldo; CHASSOT, Attico (Org.). **Ciências da Terra e meio ambiente**. São Leopoldo: Unisinos, 1999.

TUCCI, Carlos E. M.; BERTONI, Juan Carlos. **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Ed. dos Autores, 2003.

TWELE, André *et al.* Sentinel-1-based flood mapping: a fully automated processing chain. **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 13, p. 2990-3004, 2016.

ULABY, F. T.; MOORE, R. K.; FUNG, A. K. **Microwave remote sensing**: microwave remote sensing fundamentals and radiometry. Artech House, 1981. v. 1, 456 p.

ULABY, F. T. *et al.* **Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing**. University of Michigan Press, 2014.

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

VIDAL, M. R.; MASCARENHAS, A. L. dos S. Paisagens do município de Marabá a partir de uma visão geossistêmica. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 4417-4425, 2017.

ZHAO, Jie *et al.* Deriving exclusion maps from C-band SAR time-series in support of floodwater mapping. **Remote Sensing of Environment**, v. 265, p. 112668, 2021.

ZHAO, J. Y. *et al.* Urban-aware u-net for large-scale urban flood mapping using multitemporal sentinel-1 intensity and interferometric coherence. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 60, p. 1-21, 2022.

ZHANG, M. *et al.* Use of Sentinel-1 GRD SAR Images to Delineate Flood Extent in Pakistan. **Sustainability**, v. 12, n. 14, p. 5784, 2020. DOI: 10.3390/su12145784.

APÊNDICE A – PRODUTOS TÉCNICOS GERADOS A PARTIR DO SCRIPT DE MAPEAMENTO

PRODUTOS TÉCNICOS A PARTIR DO MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES URBANAS NO PERÍMETRO URBANO DE MARABÁ COM USO DE DADOS SAR E DESCRIÇÃO METODOLÓGICA DO SCRIPT DO GOOGLE EARTH ENGINE



ELABORAÇÃO

ANGELO BRUNO BATALHA SILVA

SUPERVISÃO

MILENA MARÍLIA NOGUEIRA DE ANDRADE

MARÇO DE 2025

APRESENTAÇÃO

Este anexo apresenta roteiro metodológico e os produtos técnicos obtidos através do *script* criado na plataforma Google Earth Engine para o mapeamento de inundações urbanas no perímetro urbano do município de Marabá. O código identificou a distribuição espacial das manchas de inundação no perímetro urbano de 2018 a 2023. Outro importante resultado obtido está relacionado com a frequência de inundação por bairros, como ocorreu o comportamento das manchas d'água por estes e quais os bairros que estão mais expostos à inundação. Dessa forma, os principais produtos técnicos são: Mapa de Inundação do Perímetro Urbano, Mapa de Frequência de Inundação e *script* do GEE para mapeamento de inundações urbanas.

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os presentes produtos permitem visualizar a distribuição espacial de inundações urbanas no perímetro urbano de Marabá, com a utilização de dados SAR do satélite Sentinel-1. Os mapas de 2018 a 2023 representam o mapeamento por Núcleos Urbanos, sendo eles: Marabá Pioneira, Cidade Nova, Nova Marabá, São Félix e Morada Nova. A partir destes mapas, foi possível identificar que as maiores extensões de inundações mapeadas por dados SAR ocorreram nos anos de 2018, 2020 e 2022. Em seguida, é apresentado os mapas de frequência de inundação, evidenciando os núcleos mais afetados durante os anos de 2018 a 2023.

O código disponibilizado em seguida, gera imagens pré e pós-inundação na polarização VH convertida em decibéis para o município de Marabá. O conjunto de imagens do Sentinel-1 já possui pré-processamento através do GEE, de maneira que é necessário apenas alguns ajustes para área de estudo. O código está configurado para visualizar imagens a partir do ano de 2018 a 2023, tendo em vista que a disponibilização anual de imagens para o município inicia a partir de 2018, no entanto, é permitido ao usuário selecionar outras datas posteriores a 2023 na interface dinâmica de datas já inserida no código.

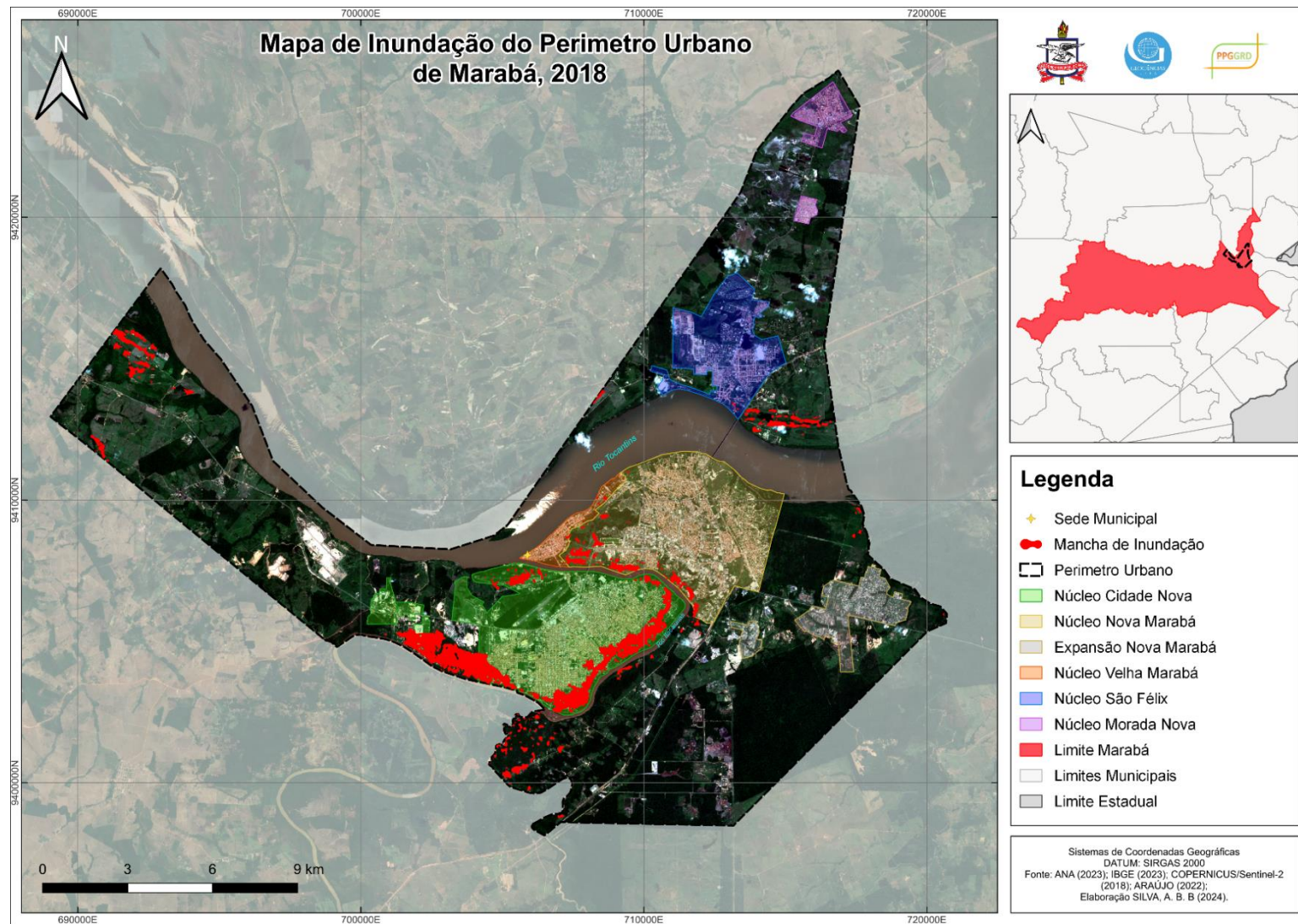
O procedimento para gerar o mapeamento de inundações segue as principais etapas:

1. Definição de região de interesse (*ROI*);
2. Seleção de imagens Sentinel-1;
3. Ajustes de parâmetros das imagens (polarização, órbita e resolução);
4. Geração das composições para antes e depois da inundação;
5. Exibição das imagens na plataforma *Google Earth Engine*;
6. Cálculo da diferença entre as imagens antes e depois;
7. Aplicação de limiar para identificar a mancha de inundação;
8. Refinamento das áreas inundadas (remoção de corpos d'água permanentes, áreas íngremes e outros objetos);
9. Cálculo de área em quilômetros quadrados e hectares;
10. Exportação das imagens para o Google Drive em formato raster e as manchas de inundação em formato raster ou *shapefile*.

A identificação e o mapeamento de inundações urbanas a partir de dados SAR configuram-se como importantes ferramentas diante da limitação de condições climáticas

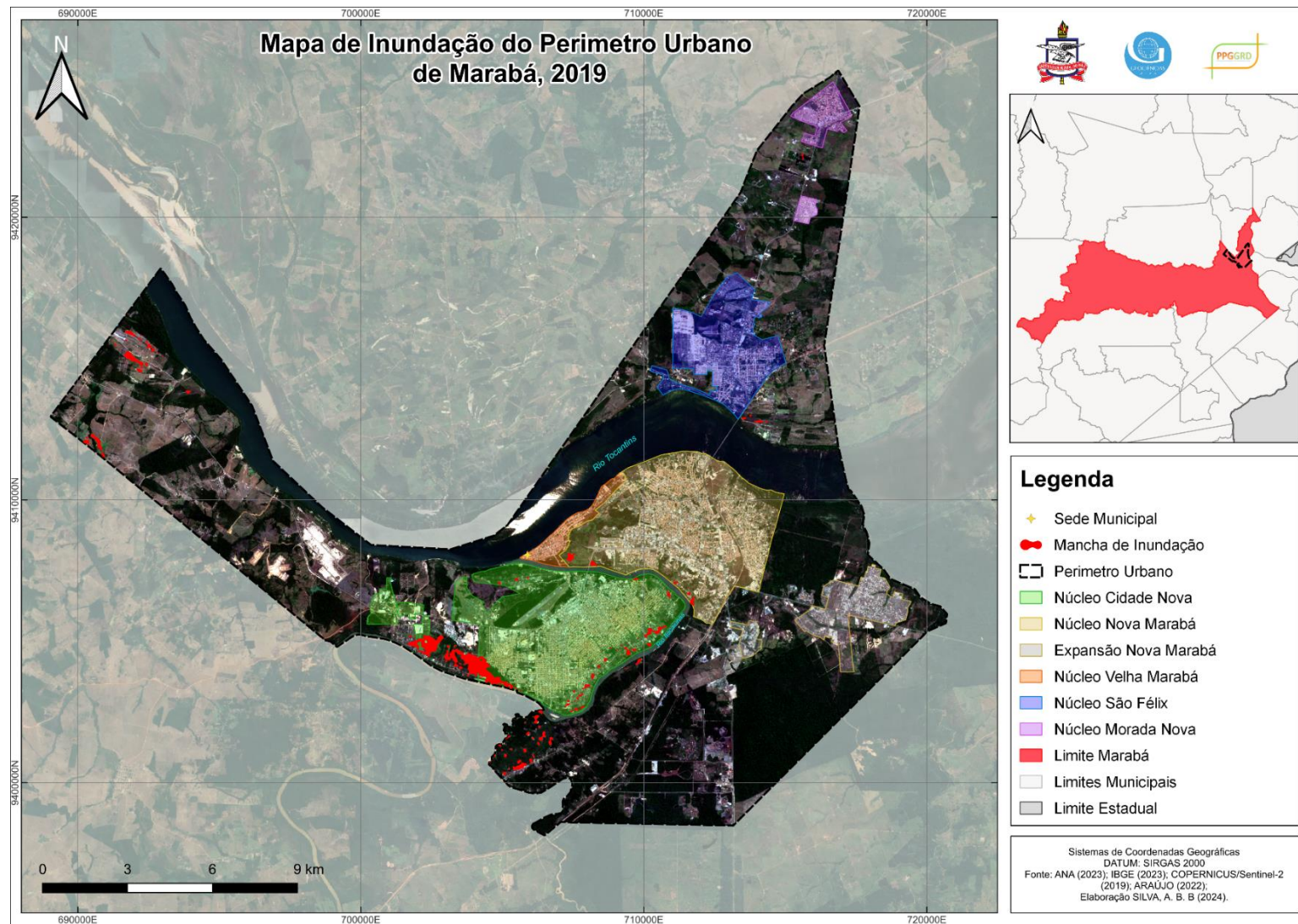
que impedem o uso de sensores ópticos. Dados SAR apresentam uma complexidade técnica que pode ser sanada por procedimentos automáticos, como o uso da plataforma Google Earth Engine que facilita o processamento das imagens em contraponto ao software SNAP que demanda um processamento maior do computador. No entanto, para aumentar a validação e robustez dos dados SAR, o conhecimento de campo e dados *in loco* são imprescindíveis para trabalhos que envolvem procedimentos automáticos. Dessa forma, a compreensão destes limitantes pode motivar práticas e metodologias mais robustas com dados SAR para alcançar a melhor validação dos resultados.

APÊNDICE B – MAPA DE INUNDAÇÃO DO PERÍMETRO URBANO DE MARABÁ, 2018.



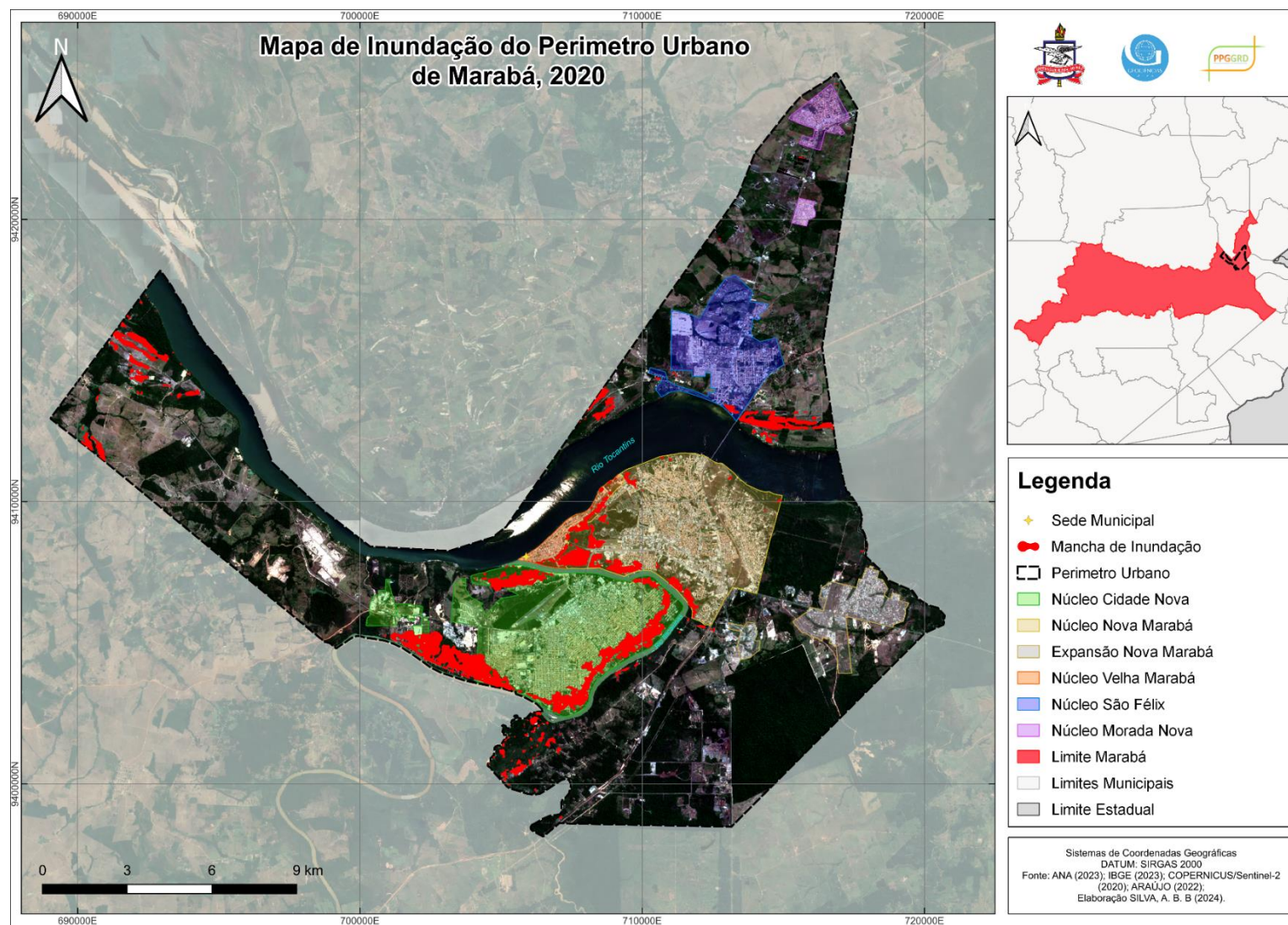
Fonte: Do Autor.

APÊNDICE C – MAPA DE INUNDAÇÃO DO PERÍMETRO URBANO DE MARABÁ, 2019.



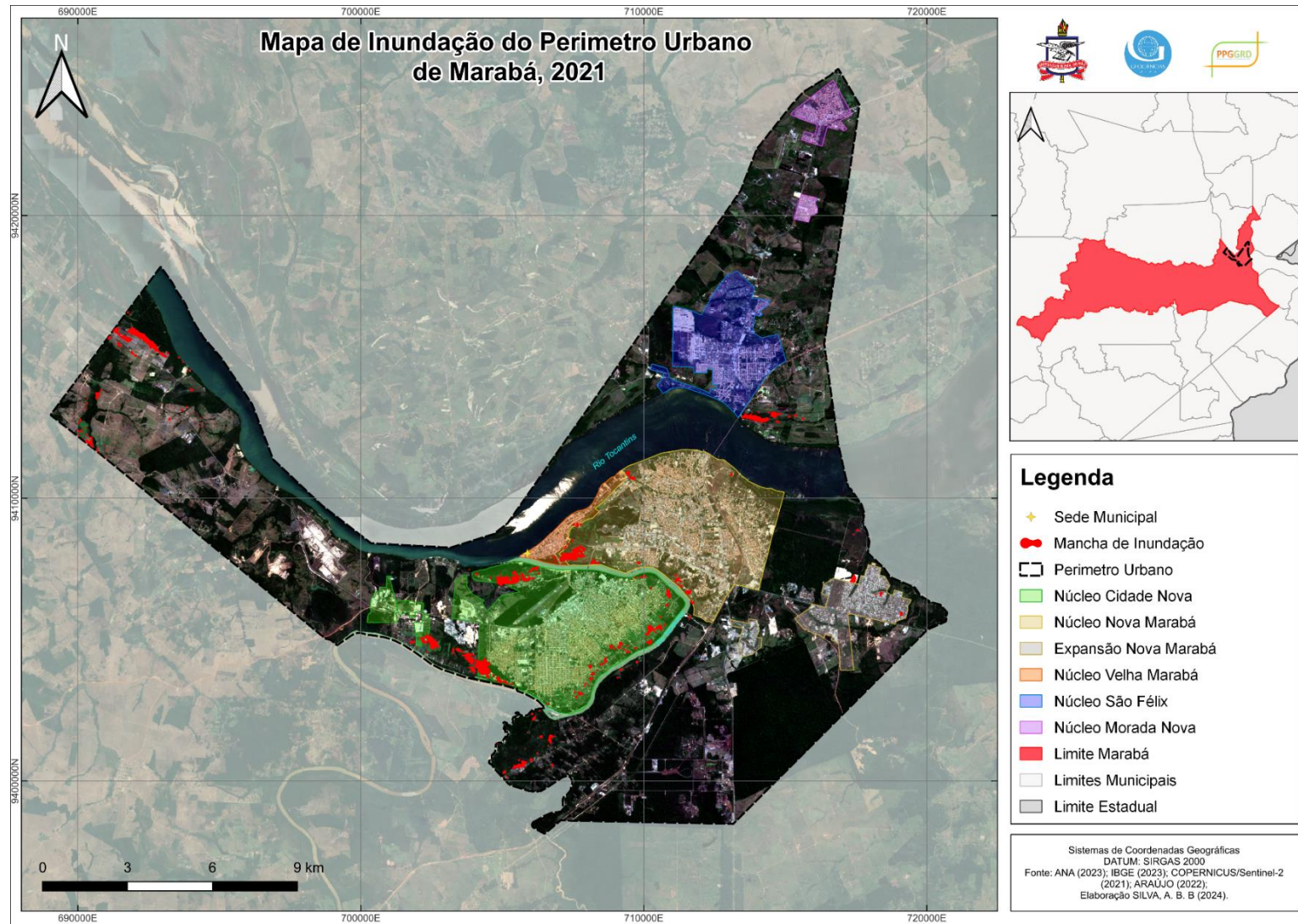
Fonte: Do Autor.

APÊNDICE D – MAPA DE INUNDAÇÃO DO PERÍMETRO URBANO DE MARABÁ, 2020.



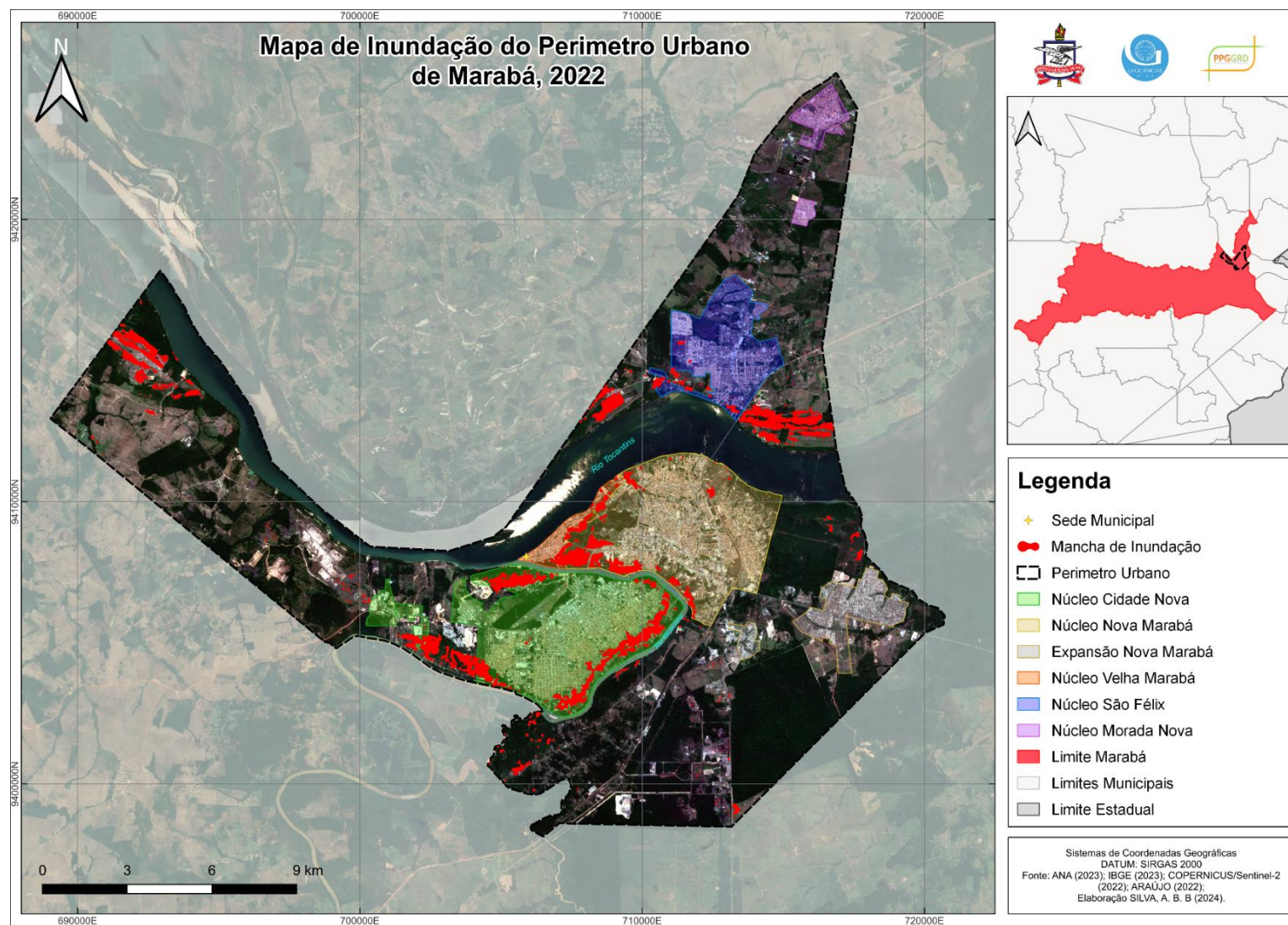
Fonte: Do Autor.

APÊNDICE E – MAPA DE INUNDAÇÃO DO PERÍMETRO URBANO DE MARABÁ, 2021.



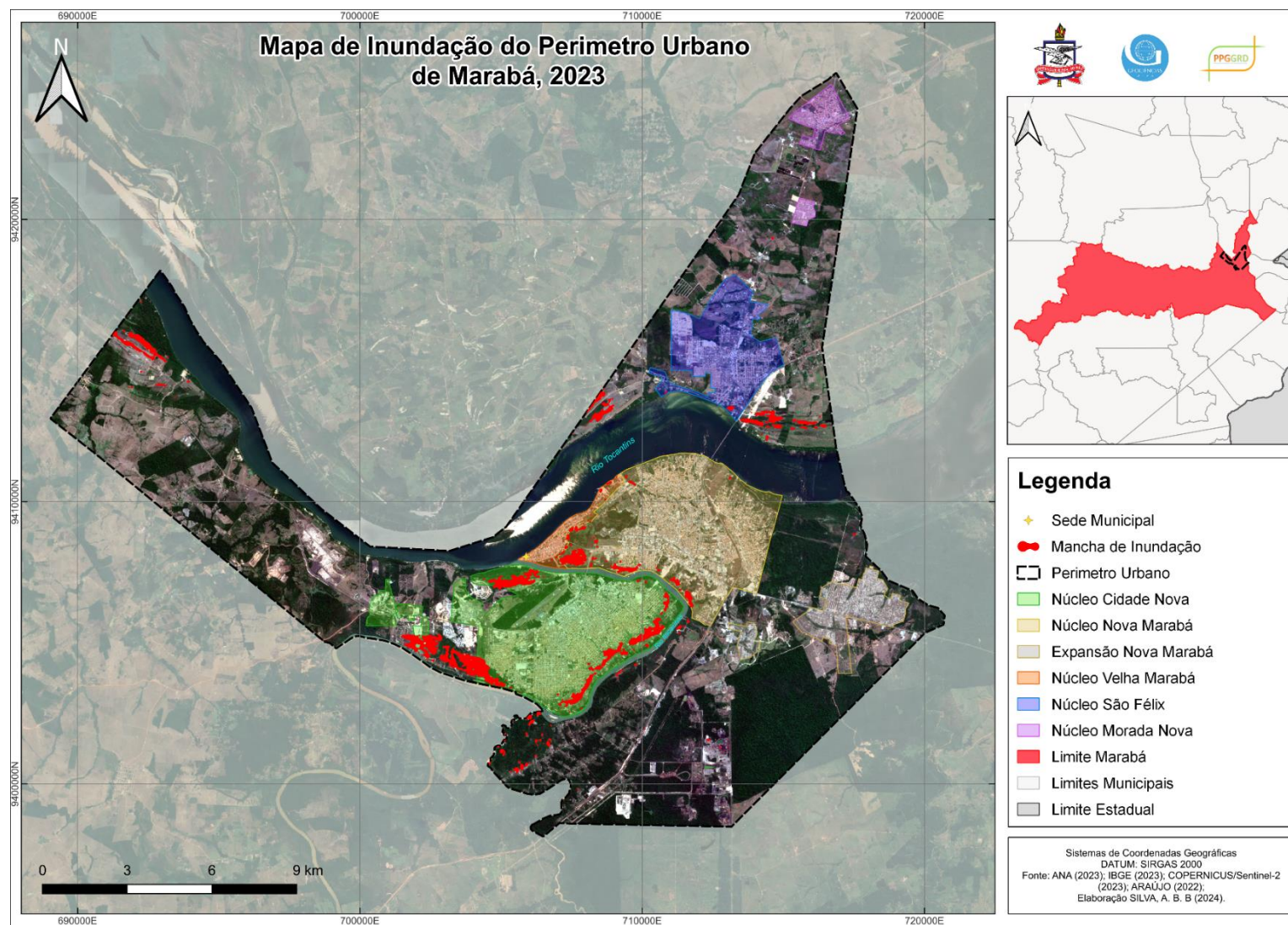
Fonte: Do Autor.

APÊNDICE F – MAPA DE INUNDAÇÃO DO PERÍMETRO URBANO DE MARABÁ, 2022.



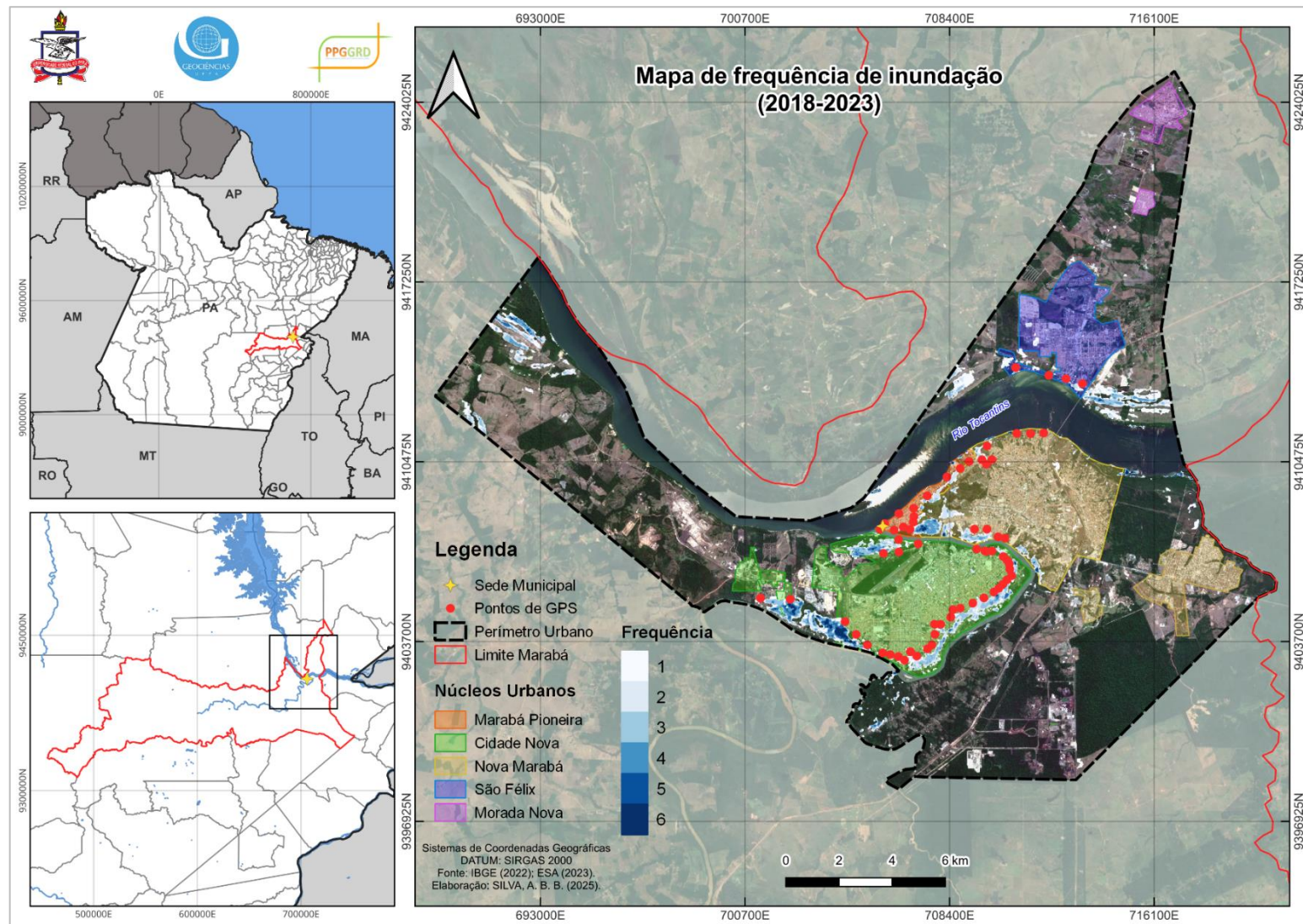
Fonte: Do Autor.

APÊNDICE G – MAPA DE INUNDAÇÃO DO PERÍMETRO URBANO DE MARABÁ, 2023.



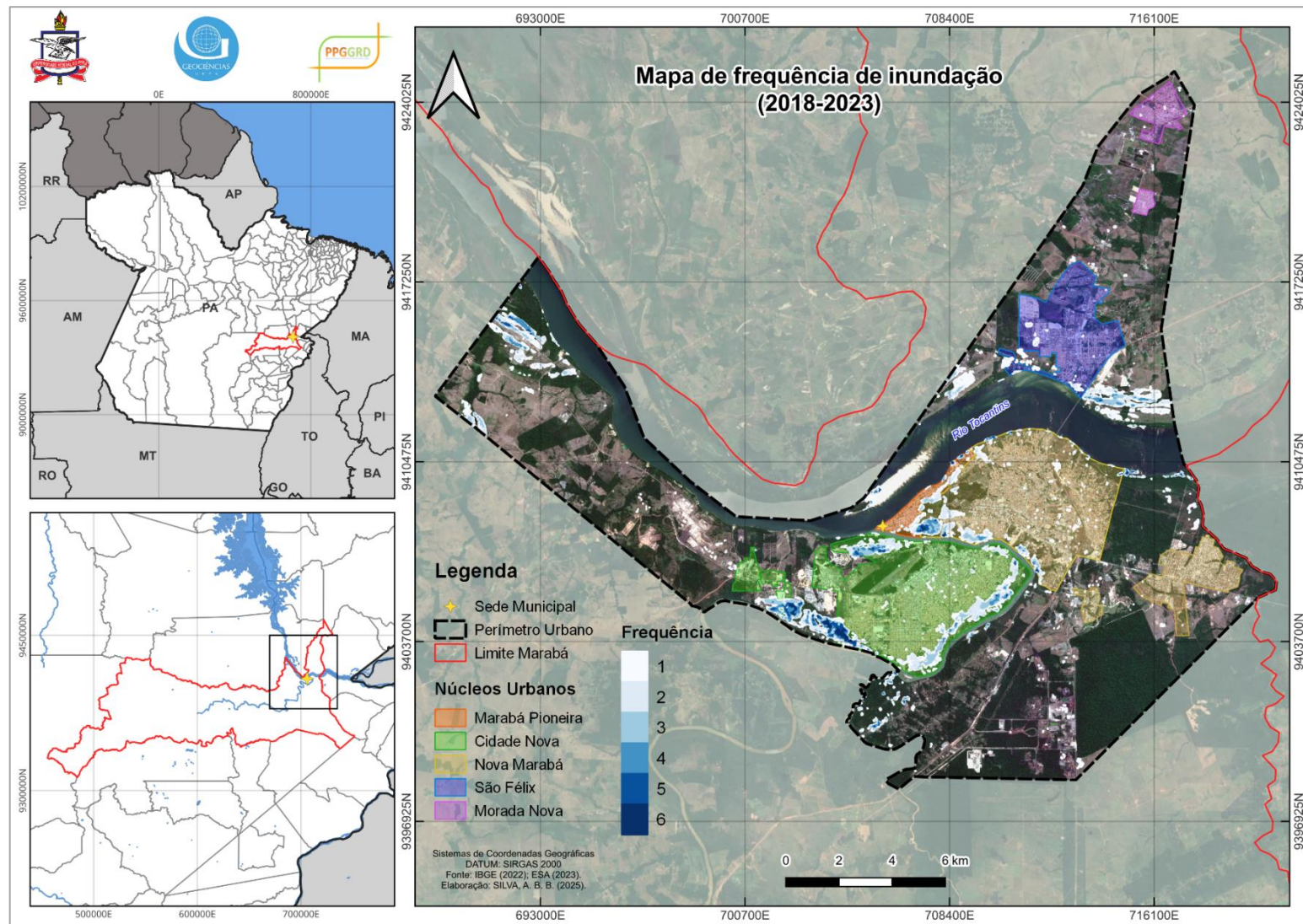
Fonte: Do Autor.

APÊNDICE H – MAPA DE FREQUÊNCIA DE INUNDAÇÃO COM PONTOS DE GPS DE 2018 A 2023.



Fonte: Do Autor.

APÊNDICE I – MAPA DE FREQUÊNCIA DE INUNDAÇÃO DE 2018 A 2023.



Fonte: Do Autor.

APÊNDICE J – CÓDIGO PARA MAPEAMENTO ATRAVÉS DO GEE

LINK DO CÓDIGO:

<https://code.earthengine.google.com/89033b7670b26112d3e0e87c7db337b9>

ETAPA 1: CONFIGURAÇÕES INICIAIS

Esta etapa define a Região de Interesse (ROI), que corresponde ao perímetro urbano de Marabá, carregado a partir de um FeatureCollection armazenado nos assets do Google Earth Engine (GEE). Neste caso, o vetor do Perímetro Urbano de Marabá Além disso, são configuradas as opções iniciais do mapa.

```
/*
Desenvolvido por Angelo Silva, discente do Programa de Pós-Graduação em Gestão de
Riscos e Desastres na Amazônia (PPGGRD) através da Universidade Federal do Pará -
2025
Contato: angelo.silva@ifch.ufpa.br
*/

// =====
// ETAPA 1: Configurações Iniciais
// =====

var ROI = ee.FeatureCollection('projects/eeangelosilvageo/assets/PERIMETRO_URBANO')
    .filter(ee.Filter.eq('ADM0_NAME', 'Marabá'));

Map.addLayer(table, { color: 'red', width: 4 }, 'Perímetro Urbano', 0);
Map.centerObject(table, 12);
Map.setOptions('Terrain');
```

ETAPA 2: DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO PRINCIPAL (runAnalysis)

A função `runAnalysis` executa toda a análise da inundação, incluindo:

- Seleção das imagens Sentinel-1 (polarização VH, órbita descendente e resolução de 10m).

```
// =====
// ETAPA 2: Parâmetros e Funções
// =====

function runAnalysis(beforeStart, beforeEnd, afterStart, afterEnd) {

// Seleção da coleção Sentinel-1
var s1Collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S1_GRD')
    .filterBounds(table)
    .filter(ee.Filter.eq('instrumentMode', 'IW'))
```



```
.filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation','VH'))
.filter(ee.Filter.eq('orbitProperties_pass','DESCENDING'))
.filter(ee.Filter.eq('resolution_meters',10))
.select('VH');
```

- Geração das composições antes e depois da inundação (beforeCollection e afterCollection).

```
// Geração das composições antes e depois da inundação
var beforeCollection =
s1Collection.filterDate(beforeStart,beforeEnd).mosaic().clip(table);
var afterCollection = s1Collection.filterDate(afterStart,
afterEnd).mosaic().clip(table);
```

- Exibição das imagens no mapa.

```
// Exibição das composições no mapa
Map.layers().reset();
Map.addLayer(table, { color: 'red', width: 4 }, 'Perímetro Urbano', 0);
Map.addLayer(beforeCollection, { min: -25, max: 0 }, 'Before Floods', 0);
Map.addLayer(afterCollection, { min: -25, max: 0 }, 'After Floods', 0);
```

- Exportação das imagens pré e pós-inundação para o Google Drive.

```
// Exportação das imagens de radar
Export.image.toDrive({
image: beforeCollection,
description: 'Radar_BeforeFlood',
scale: 10,
region: table.geometry(),
maxPixels: 1e9
});

Export.image.toDrive({
image: afterCollection,
description: 'Radar_AfterFlood',
scale: 10,
region: table.geometry(),
maxPixels: 1e9
});
```

- Cálculo da diferença entre as imagens (difference) com suavização espacial.

```
// Cálculo da diferença entre as imagens antes e depois
var smoothingRadius = 50;
var difference = afterCollection.focal_median(smoothingRadius, 'circle', 'meters')
.divide(beforeCollection.focal_median(smoothingRadius, 'circle', 'meters'));
```

- Identificação das áreas inundadas aplicando um limiar (threshold = 1.30).

```
// Identificação das áreas inundadas com threshold dinâmico
var diffThreshold = 1.30;
var flooded = difference.gt(diffThreshold).rename('water').selfMask();
```

- Refinamento das áreas inundadas (remoção de corpos d'água permanentes, áreas íngremes e objetos pequenos).

```
// Refinamento das áreas inundadas
var permanentWater = ee.Image("JRC/GSW1_4/GlobalSurfaceWater")
  .select('seasonality').gte(10).clip(table);

flooded = flooded.where(permanentWater, 0).selfMask();

var slopeThreshold = 5;
var terrain = ee.Algorithms.Terrain(ee.Image("WWF/HydroSHEDS/03VFDEM"));
var slope = terrain.select('slope');
flooded = flooded.updateMask(slope.lt(slopeThreshold));

var connectedPixelThreshold = 10;
var connections = flooded.connectedPixelCount();
flooded = flooded.updateMask(connections.gt(connectedPixelThreshold));

// Exibição da extensão da inundação no mapa
Map.addLayer(flooded, { min: 0, max: 1, palette: ['blue'] }, 'Flood Extent');
```

- Cálculo da área inundada em hectares e quilômetros quadrados.

```
// Cálculo da área inundada
var flood_stats = flooded.multiply(ee.Image.pixelArea()).reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: table.geometry(),
  scale: 10,
  maxPixels: 1e12,
});

var floodAreaHa = ee.Number(flood_stats.get('water')).divide(10000).round();
var floodAreaKm2 = floodAreaHa.divide(100).round();

print('Área Inundada (Ha)', floodAreaHa);
print('Área Inundada (km²)', floodAreaKm2);
```

- Exportação dos resultados em formato raster e vetorial (Shapefile).

```
// Exporta os resultados em formato raster
Export.image.toDrive({
  image: flooded.clip(table),
  description: 'FloodExtent' + afterStart + '_to_' + afterEnd,
  scale: 10,
  region: table.geometry(),
  maxPixels: 1e9
});
```

```
// Conversão do raster de inundação para vetor
var floodVector = flooded.reduceToVectors({
  geometryType: 'polygon',
  reducer: ee.Reducer.countEvery(),
  scale: 10,
  maxPixels: 1e9,
  geometry: table.geometry()
});

// Exportação do vetor no formato Shapefile
Export.table.toDrive({
  collection: floodVector,
  description: 'FloodExtent_Shapefile' + afterStart + '_to_' + afterEnd,
  fileFormat: 'SHP'
});
}
```

ETAPA 3: INTERFACE GRÁFICA PARA SELEÇÃO DE DATAS

- Cria menus interativos para que o usuário selecione períodos de pré e pós-inundação.

```
var years = ['2018', '2019', '2020', '2021', '2022', '2023', '2024'];
var months = [
  { number: '01', days: 31 }, { number: '02', days: 28 }, { number: '03', days: 31 },
  { number: '04', days: 30 }, { number: '05', days: 31 }, { number: '06', days: 30 },
  { number: '07', days: 31 }, { number: '08', days: 31 }, { number: '09', days: 30 },
  { number: '10', days: 31 }, { number: '11', days: 30 }, { number: '12', days: 31 }
];

function getDaysInMonth(year, month) {
  if (month === '02') {
    var isLeapYear = (parseInt(year) % 4 === 0 && parseInt(year) % 100 !== 0) ||
      (parseInt(year) % 400 === 0);
    return isLeapYear ? 29 : 28;
  }
  for (var i = 0; i < months.length; i++) {
    if (months[i].number === month) {
      return months[i].days;
    }
  }
  return 0; // Retorna 0 se o mês não for encontrado
}

function zeroPad(num, length) {
  var str = String(num);
  while (str.length < length) {
    str = '0' + str;
  }
}
```

```

    return str;
}

function createDateSelector(labelText, defaultYear, defaultMonth, defaultDay) {
var yearSelect = ui.Select({ items: years, placeholder: 'Ano', value: defaultYear
});
var monthSelect = ui.Select({ items: months.map(function (m) { return m.number; }),
placeholder: 'Mês', value: defaultMonth });
var daySelect = ui.Select({
items: Array.from({ length: getDaysInMonth(defaultYear, defaultMonth) }, function
(_, i) { return zeroPad(i + 1, 2); }),
placeholder: 'Dia',
value: defaultDay
});

var panel = ui.Panel({
  widgets: [yearSelect, monthSelect, daySelect],
  layout: ui.Panel.Layout.Flow('horizontal'),
  style: { margin: '0 0 10px 0' }
});

function updateDays() {
  var year = yearSelect.getValue();
  var month = monthSelect.getValue();
  var daysInMonth = getDaysInMonth(year, month);

  // Recriar o seletor de dias
  var currentDay = daySelect.getValue();
  var newDaySelect = ui.Select({
    items: Array.from({ length: daysInMonth }, function (_, i) { return zeroPad(i
+ 1, 2); }),
    placeholder: 'Dia',
    value: parseInt(currentDay) <= daysInMonth ? currentDay :
zeroPad(daysInMonth, 2)
  });

  // Substituir o seletor de dias no painel
  panel.widgets().set(2, newDaySelect);
  daySelect = newDaySelect;
}
yearSelect.onChange(updateDays);
monthSelect.onChange(updateDays);

return {
  panel: panel,
  getYear: function () { return yearSelect.getValue(); },
  getMonth: function () { return monthSelect.getValue(); },
  getDay: function () { return daySelect.getValue(); }
};
}

```

```
// =====
// Configuração da Interface de Datas
// =====

var beforeStartDate = createDateSelector('Pré-Inundação - Início:', '2022', '01',
'01');
var beforeEndDate = createDateSelector('Pré-Inundação - Fim:', '2022', '06', '30');
var afterStartDate = createDateSelector('Pós-Inundação - Início:', '2022', '01',
'08');
var afterEndDate = createDateSelector('Pós-Inundação - Fim:', '2022', '01', '31');

var runButton = ui.Button({
  label: 'Atualizar Análise',
  onClick: function () {
    var beforeStart = beforeStartDate.getYear() + '-' + beforeStartDate.getMonth()
+ '-' + beforeStartDate.getDay();
    var beforeEnd = beforeEndDate.getYear() + '-' + beforeEndDate.getMonth() + '-'
+ beforeEndDate.getDay();
    var afterStart = afterStartDate.getYear() + '-' + afterStartDate.getMonth() +
'- ' + afterStartDate.getDay();
    var afterEnd = afterEndDate.getYear() + '-' + afterEndDate.getMonth() + '-' +
afterEndDate.getDay();

    runAnalysis(beforeStart, beforeEnd, afterStart, afterEnd);
  }
});
var panel = ui.Panel({
  widgets: [
    ui.Label('Selecione as Datas para a Análise', { fontWeight: 'bold', fontSize:
'16px' }),
    ui.Label('Pré-Inundação:'),
    beforeStartDate.panel, beforeEndDate.panel,
    ui.Label('Pós-Inundação:'),
    afterStartDate.panel, afterEndDate.panel,
    runButton
  ],
  style: { width: '300px', position: 'top-left' }
});

Map.add(panel);
```

ETAPA 4: INFORMAÇÕES DE AUTORIA E LEGENDA

```
// =====
// Quadro de Informações de Autoria
// =====

var infoPanel = ui.Panel({
  widgets: [
    ui.Label(
      'Desenvolvido por Angelo Silva através do Programa de Pós-Graduação em Gestão
de Riscos e Desastres na Amazônia (PPGGRD) da Universidade Federal do Pará',
      { fontSize: '10px', color: 'black', margin: '4px 0' }
    ),
    ui.Label(
```

```

        'Contato: angelo.silva@ifch.ufpa.br // Belém/PA, 2025.',
        { fontSize: '10px', color: 'black', margin: '0 0 4px 0' }
    )
],
style: {
    width: '300px',
    position: 'bottom-right', // Posiciona no lado direito, abaixo da legenda
    margin: '10px 0'
}
});

// Adiciona o quadro de informações ao mapa
Map.add(infoPanel);

```

- Cria uma legenda interativa para diferenciar áreas inundadas (azul) e perímetro urbano (vermelho).

```

// =====
// ETAPA 4: Adição de Legenda no Mapa
// =====

var legend = ui.Panel({
    style: {
        position: 'bottom-right',
        padding: '8px 15px',
    }
});

var legendTitle = ui.Label('Legenda', {
    fontWeight: 'bold',
    fontSize: '16px',
    margin: '0 0 10px 0',
    padding: '0'
});

legend.add(legendTitle);

var makeRow = function(color, name) {
    var colorBox = ui.Label({
        style: {
            backgroundColor: color,
            padding: '8px',
            margin: '0 0 4px 0'
        }
    });

    var description = ui.Label({
        value: name,
        style: { margin: '0 0 4px 6px' }
    });

    return ui.Panel({
        widgets: [colorBox, description],
        layout: ui.Panel.Layout.Flow('horizontal')
    });
};

```



```
};  
  
var palette = ['blue', 'red'];  
var names = ['Extensão da Inundação', 'Limite do Perímetro Urbano'];  
  
for (var i = 0; i < palette.length; i++) {  
    legend.add(makeRow(palette[i], names[i]));  
}  
  
Map.add(legend);
```