

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Viviane Caroline Oliveira Abib

**MAPEAMENTO DE ÁREAS INUNDÁVEIS ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO  
REMOTO: ANÁLISE DE INCERTEZAS**

Santa Maria  
2023

Viviane Caroline Oliveira Abib

**MAPEAMENTO DE ÁREAS INUNDÁVEIS ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO  
REMOTO: ANÁLISE DE INCERTEZAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestra em Engenharia Ambiental.**

Orientador: Prof. Dr. Rafael Cabral Cruz

Santa Maria  
2023

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Abib, Viviane Caroline Oliveira  
MAPEAMENTO DE ÁREAS INUNDÁVEIS ATRAVÉS DE  
SENSORIAMENTO REMOTO: ANÁLISE DE INCERTEZAS / Viviane  
Caroline Oliveira Abib.- 2023.  
78 p.; 30 cm

Orientador: Rafael Cabral Cruz  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Ambiental, RS, 2023

1. MAPEAMENTO DE ÁREAS INUNDÁVEIS 2. SENSORIAMENTO  
REMOTO I. Cruz, Rafael Cabral II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, VIVIANE CAROLINE OLIVEIRA ABIB, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Viviane Caroline Oliveira Abib

**MAPEAMENTO DE ÁREAS INUNDÁVEIS ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO  
REMOTO: ANÁLISE DE INCERTEZAS**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestra em Engenharia Ambiental**.

Aprovada em 21 de julho de 2023.

---

**Prof. Rafael Cabral Cruz, Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)**

---

**Prof. Daniel Alasia Piccili, Dr. (UFSM)  
Instituição Universidade Federal de Santa Maria**

---

**Prof.<sup>a</sup> Aline Biasoli Trentin, Dr.<sup>a</sup> (UNIPAMPA)**

Santa Maria, 2023.

*Dedico esse trabalho à minha família que sempre comemorou minhas vitórias como se de todos nós fossem, e são!*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço inicialmente à minha família que sempre me apoiou em cada decisão que me trouxe até aqui e ao meu marido Matheus que sempre me incentiva e me apoia em minhas escolhas.

Também quero agradecer ao professor Rafael, que me recebeu durante dias em seu ambiente de trabalho, para que me auxiliasse de perto e dessa forma eu pudesse me sentir confiante com o desenvolvimento e os resultados da minha pesquisa.

Por fim, quero agradecer aos pesquisadores, Luiz Henrique de Araújo Gouvêa e David Costa, elaboradores da modelagem de referência no comitê Piabanha, que utilizei durante o estudo, por estarem sempre dispostos e se esforçarem para conseguir todos os dados necessários para que eu pudesse utilizar.

“Ecologia sem luta de classes é jardinagem”.  
MENDES, Chico.

## RESUMO

### **MAPEAMENTO DE ÁREAS INUNDÁVEIS ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO: ANÁLISE DE INCERTEZAS**

AUTORA: Viviane Caroline Oliveira Abib  
ORIENTADOR: Rafael Cabral Cruz

O mapeamento de áreas inundáveis é uma medida não-estrutural, que atua como uma medida de controle, auxiliando o processo de tomada de decisão dos entes do Estado, que tem a obrigação legislativa de efetuarem planejamentos urbanos visando à prevenção de desastres e calamidades, como as inundações. Esse estudo teve por objetivo analisar as incertezas de um mapeamento de inundação feito a partir de sensoriamento remoto, com a utilização de imagens de satélite (ALOS e SRTM), comparando ao mapeamento de um evento de cheia, numa sub-bacia localizada dentro da bacia hidrográfica do rio Piabanha, feito com dados de topografia a campo. Os dois modelos digitais de elevação (MDE) foram submetidos a uma filtragem no software CloudCompare, gerando dois novos MDEs para a análise. Os MDEs foram submetidos ao processo de modelagem no software HECRAS, seguindo os mesmos parâmetros utilizados na modelagem original de referência. Os resultados mostraram que o mapeamento das áreas de inundação, feito a partir de sensoriamento remoto, é possível de ser aplicado em locais onde não há um mapeamento da área de inundação, de modo acessível e podendo ser realizado de qualquer localidade. A modelagem deve ser feita com os MDEs filtrados, que obtiveram maiores índices de combinação com o mapeamento de referência e que seja acrescentada uma margem de erro no entorno da modelagem, principalmente em trechos onde o curso d'água possui curvas sinuosas, visto que a modelagem não delimita com precisão essas áreas. Os dados mostram que aproximadamente 40% da modelagem feita por sensoriamento remoto ocupariam uma zona com alta probabilidade de inundação e o restante pode ser delimitado como zona de média e baixa probabilidade, a critério do planejador. Por fim, o objetivo do estudo foi concluído, identificando as incertezas do mapeamento de inundação com sensoriamento remoto e sugerindo pontos de atenção para a aplicação do método em outras análises. Dessa forma, um dos principais problemas



urbanos dos municípios brasileiros, as inundações, podem ter uma fonte dados de embasamento, para que medidas de prevenção sejam tomadas, sem o desprendimento de excessivos recursos profissionais e financeiros. Outrossim, pesquisadores e universidades, podem mapear remotamente as bacias e disponibilizar publicamente, para que os comitês responsáveis pelas bacias hidrográficas ou administradores públicos, possam utilizar durante a gestão dos municípios, auxiliando um planejamento urbano que previna os impactos do processo de inundação.

**Palavras-chave:** Inundação; Sensoriamento remoto; Planejamento urbano; Mapeamento de áreas inundáveis.

## **ABSTRACT**

### **MAPPING OF FLOOD AREAS USING REMOTE SENSING: UNCERTAINTY ANALYSIS**

AUTHOR: Viviane Caroline Oliveira Abib  
ADVISOR: Rafael Cabral Cruz

The mapping of floodable areas is a non-structural measure, which acts as a control measure, assisting the decision-making process of State entities, which have the legislative obligation to carry out urban planning aimed at preventing disasters and calamities, such as floods. This study aimed to analyze the uncertainties of a flood mapping made from remote sensing, using satellite images (ALOS and SRTM), compared to the mapping of a flood event, in a sub-basin located within the basin hydrographic analysis of the Piabanha River, made with field topography data. The two digital elevation models (DEM) were filtered in the CloudCompare software, generating two new DEMs for analysis. The DEMs were subjected to the modeling process in the HE CRAS software, following the same parameters used in the original reference modeling. The results showed that the mapping of flood areas, made using remote sensing, can be applied in places where there is no mapping of the flood area, in an accessible way and can be carried out from any location. The modeling must be done with the filtered DEMs, which obtained higher levels of combination with the reference mapping and that a margin of error is added around the modeling, especially in stretches where the watercourse has sinuous curves, since the Modeling does not precisely delimit these areas. The data shows that approximately 40% of the modeling done by remote sensing would occupy a zone with a high probability of flooding and the remainder can be delimited as a medium and low probability zone, at the planner's discretion. Finally, the objective of the study was concluded, identifying the uncertainties of flood mapping with remote sensing and suggesting points of attention for the application of the method in other analyses. In this way, one of the main urban problems in Brazilian municipalities, floods, can have a source of supporting data, so that prevention measures can be taken, without the need for excessive professional and financial resources. Furthermore, researchers and universities can remotely map the basins and make them publicly available, so that the committees responsible for the river basins or public

administrators can use them during the management of municipalities, helping urban planning that prevents the impacts of the flooding process.

**Keywords:** Inundation; Remote sensing; Urban planning; Mapping of floodable areas.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Aplicação do Filtro CSF/Cloud Compare .....	41
Figura 2—Localização da Sub-bacia do Rio Três Pedras.....	43
Figura 3—Altitude e hidrografia sub-bacia do Rio Três Pedras.....	44
Figura 4—Declividade sub-bacia do Rio Três Pedras.....	45
Figura 5—Movimento de massa causado pelas chuvas na cidade de Petrópolis — RJ ..	47
Figura 6 — Inundação no centro histórico da cidade de Petrópolis — RJ .....	48
Figura 7 — Representação da geometria vetorial .....	49
Figura 8—Etapas de processamento MDEs .....	51
Figura 9 — Comparação SRTM e modelo original.....	57
Figura 10 — Comparação ALOS e modelo original .....	57
Figura 11—Comparação de modelagens com margem de erro.....	64
Figura 12—Mapeamento das áreas inundáveis.....	67

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Áreas simuladas .....	58
Gráfico 2 — Áreas em acerto .....	59
Gráfico 3 – Áreas em erro (m <sup>2</sup> ).....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Maior distância de erro em cada modelagem.....	60
Tabela 2 — Porcentagem de combinação (Índice F) .....	61
Tabela 3 — Porcentagem de combinação (Acurácia Geral) .....	62
Tabela 4 — Porcentagem de combinação (FIT [%]) .....	62
Tabela 5 — Porcentagem de combinação (TAF) .....	63

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1—Gestão das águas urbanas.....	26
Quadro 2 — Registros de ocorrência de grandes enchentes em Petrópolis.....	46
Quadro 3— <i>Steady Flow Data</i> .....	52
Quadro 4— <i>Boundary Conditions</i> .....	53

## LISTA DE EQUAÇÕES

(1) Ground Resolved Distance (GRD) .....	36
(2) F estatístico.....	54
(3) Acurácia Geral .....	55
(4) FIT (%) .....	55
(5) taxa de alarme falso (TAF).....	55



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>19</b>
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
<b>3.</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>20</b>
<b>4.</b>	<b>REVISÃO TEÓRICA</b> .....	<b>21</b>
4.1	INUNDAÇÕES.....	21
4.2	PLANEJAMENTO URBANO E MAPEAMENTO DE ÁREAS INUNDÁVEIS.....	26
4.3	TOPOGRAFIA E MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO.....	29
4.4	SENSORIAMENTO REMOTO.....	33
<b>4.4.1</b>	<b>SRTM</b> .....	<b>38</b>
<b>4.4.2</b>	<b>ALOS PALSAR</b> .....	<b>39</b>
4.5	FILTROS DIGITAIS.....	39
4.6	HEC-RAS.....	42
4.7	MODELO HAND.....	42
4.8	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	43
<b>5.</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>49</b>
5.1	MODELAGEM.....	49
<b>6.</b>	<b>ANÁLISES</b> .....	<b>53</b>
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>56</b>
<b>8.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>69</b>
<b>9.</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>71</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O mapeamento de áreas inundáveis, é uma medida não estrutural cujo objetivo é atuar como uma ferramenta de planejamento e prevenção, para áreas urbanas e para a bacia hidrográfica, feito a partir de uma análise dos fatores de maior influência para o problema, como chuva, relevo, etc.(SAUERESSIG, 2012; MIOLA, 2013).

Considerando que a topografia é a informação necessária para alimentar os modelos hidrodinâmicos, é possível adquiri-la gratuitamente ou por meio da contratação de serviços de levantamento topográfico em campo. De modo que a definição do método, implica na variação da precisão dos dados obtidos (VICENTE, 2022).

Devido às dificuldades e demandas do levantamento topográfico feito a campo, se considera a utilização de modelos digitais de elevação (MDE), obtidos mediante sensoriamento remoto, como uma forma de se obter informações, a fim de que mais municípios tenham acesso a um mapeamento confiável, feito com um menor desprendimento de recursos (FIGUEIREDO, 2015).

Para tanto, deve ser avaliado o desempenho dos modelos digitais de elevação como fonte de dados iniciais, na construção de um mapeamento de áreas inundáveis, como uma estratégia que torna acessível à aquisição de dados, visando controlar, evitar ou mitigar os impactos que as cheias e inundações podem causar (FONSECA, 2023).

Dessa forma, o objetivo do presente estudo é comparar o mapeamento da área de inundação obtido a partir de dados de sensoriamento remoto, com o mapeamento feito a partir de dados topográficos obtidos em campo, com a utilização do algoritmo CSF (filtro de simulação de pano) para filtragem dos MDEs e realizar análises gráficas e estatísticas dos resultados.

## **2. OBJETIVO**

O estudo visa analisar comparativamente duas metodologias de mapeamento de área de inundação, sendo uma obtida com dados de topografia efetuada a campo e a outra obtida a partir de sensoriamento remoto, com aplicação de filtragem digital. Para demonstrar as incertezas apresentadas pela comparação das metodologias.

### **2.1 Objetivos Específicos**

1. Importar os dados e parâmetros utilizados para o mapeamento do evento de cheia da sub-bacia analisada;
2. Fazer o mapeamento das áreas inundáveis da sub-bacia, seguindo os mesmos parâmetros do evento já mapeado, utilizando como dado de entrada os modelos digitais de elevação, obtidos por meio de imagens de satélite (ALOS e SRTM);
3. Aplicar uma filtragem digital nos MDEs obtidos via sensoriamento remoto, para se obter modelos filtrados para novos mapeamentos de comparação;
4. Analisar as incertezas do mapeamento obtido com os dados de sensoriamento remoto, a partir de uma comparação com o modelo de referência;

### 3. JUSTIFICATIVA

A topografia vem sendo usada para fins de mapeamento de área de inundação em cidades brasileiras (VICENTE, 2022; FERNANDES, 2022; MENDES, 2022; CORREA, 2022; CAMPANA, 2023; NAVARRO, 2023), contudo, para tal fim, são necessários dados e informações que, muitas vezes, dependem do investimento de recursos financeiros e profissionais para a obtenção de informações via um trabalho efetuado a campo.

No Brasil, a Lei n.º 12.608, de 10 de abril de 2012, em seu Art. 2º, institui que é dever da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios adotarem medidas necessárias à redução dos riscos de desastres (BRASIL, 2012). Todavia, um mapeamento de área de inundação do município, por exemplo, demandaria custos e recursos que muitas vezes as cidades não dispõem, dessa forma, se torna possível compreender a falta de informação e dados a respeito dos eventos extremos que ocorrem em vários lugares do país.

Por esse motivo, uma análise comparativa do mapeamento de área de inundação, feito a partir de dados obtidos com topografia a campo e o mapeamento de área de inundação, obtido mediante dados de sensoriamento remoto, que apresente a viabilidade do mapeamento feito de maneira remota, pode indicar uma alternativa para que profissionais, pesquisadores e até mesmo universidades, possam acessar, de maneira gratuita, o levantamento dessas informações, juntamente com o mapeamento, que pode ser utilizado para pautar discussões sobre o planejamento urbano de municípios diversos, visto que o levantamento pode ser feito de qualquer localidade, exigindo menores custos de execução.

Também é importante ressaltar que essa alternativa, sendo uma medida de controle não estrutural, além de não depender da utilização de excessivos recursos financeiros, também considera as características sociais das pessoas atingidas pelo problema, o que difere de alternativas estruturais que muitas vezes privilegiam pessoas de melhores condições financeiras e negligenciam aqueles que não podem pagar por melhores condições de infraestrutura em seu ambiente habitacional.

## **4. REVISÃO TEÓRICA**

Neste segmento, serão expostos os princípios teóricos do conjunto de ideias relacionadas ao tópico abordado. Para que o assunto e a metodologia proposta seja compreensível e relevante, existem alguns assuntos que precisam ser tratados e entendidos, como as inundações, o planejamento urbano, o mapeamento de áreas inundáveis, a topografia, os modelos digitais de elevação, o sensoriamento remoto, os filtros digitais, o software HEC-RAS e a caracterização da área de estudo.

Dessa forma, a definição e caracterização de alguns tópicos referentes a esses assuntos serão discutidos por meio de uma análise teórico-conceitual abrangente na literatura especializada que trata do assunto em questão.

### **4.1 Inundações**

A urbanização no Brasil iniciou no século XIX, impulsionada pela implantação de indústrias nos centros urbanos e pela redução na demanda por trabalhadores agrícolas devido ao uso de máquinas no campo. A partir dos anos 70, houve uma mudança social significativa no país, com a população urbana superando a população rural, e essa tendência tem se mantido constante até os dias atuais (FELICIANO, 2022).

Os impactos resultantes dessa intensa urbanização nas últimas cinco décadas são de extrema importância para compreender a influência humana na ocorrência de catástrofes causadas por eventos naturais. No que diz respeito à gestão das águas, esses impactos são intensos e resultam em alterações significativas no ciclo hidrológico, principalmente devido à alteração das superfícies de escoamento, canalização dos fluxos que antes eram dispersos e o aumento da poluição e contaminação do ar, afetando diretamente o padrão de escoamento em sinergia com as mudanças climáticas (FELICIANO, 2022).

As inundações e enchentes são eventos naturais relacionados à água, que ocorrem nos cursos dos rios. Embora frequentemente confundidos, esses termos possuem significados diferentes. A inundação ocorre quando um corpo de água transborda, alcançando as áreas planas de suas laterais, conhecidas como planície de inundação. E a enchente ocorre quando o nível da água no canal de drenagem

aumenta devido ao aumento do fluxo, sem transbordamento. Tendo, a inundação, portanto, o impacto mais significativo na sociedade (TUCCI, 2012; DA COSTA, 2022).

O tamanho e a ocorrência das inundações dependem da intensidade e distribuição da precipitação na bacia hidrográfica, da taxa de infiltração de água e saturação do solo, bem como das características morfométricas e morfológicas da bacia de drenagem (DA COSTA, 2022).

As chuvas intensas podem resultar em enchentes na região hidrográfica quando há um excesso de água que não consegue ser escoado adequadamente, resultando no alagamento de áreas planas próximas aos rios, dependendo da topografia local. Esses eventos ocorrem de maneira imprevisível devido a fatores climáticos locais e regionais. Esse tipo de evento é conhecido como inundação ribeirinha (TUCCI, 2012).

As inundações imprevistas, causadas por tempestades intensas, caracterizam-se por uma rápida elevação do nível da água, normalmente localizados em bacias hidrográficas de pequeno porte com encostas íngremes. Por conta da alta intensidade e início súbito, essas cheias resultam em sérias calamidades locais (DA COSTA, 2022).

Devido à ocorrência frequente de eventos hidrológicos extremos, especialmente nas áreas urbanas com alta taxa de impermeabilização do solo e densidade populacional elevada, as inundações urbanas são fenômenos que não se limitam apenas aos grandes centros urbanos, mas também são observados em cidades de médio e até mesmo pequeno porte (FARIAS e MENDONÇA, 2022).

Conforme a população torna o solo impermeável e acelera o escoamento de água mediante sistemas de tubulação e canais, a quantidade de água que chega simultaneamente ao sistema de drenagem aumenta, levando a inundações mais frequentes em comparação com tempos em que a superfície era permeável e o escoamento era natural. Essas inundações são resultados da urbanização ou do manejo inadequado da drenagem urbana (TUCCI, 2012).

De acordo com Tucci (2012), esses dois tipos de inundação, a ribeirinha ou a causada pela urbanização, podem ocorrer separadamente ou em conjunto, porém,

geralmente, as inundações ribeirinhas acontecem em bacias hidrográficas de médio e grande porte ( $> 500 \text{ km}^2$ ), em trechos com pouca inclinação e fluxo de água restrito, enquanto as inundações devido à drenagem urbana ocorrem em bacias menores (1 -  $100 \text{ km}^2$  — com exceção de grandes cidades, como São Paulo).

No Brasil, as chuvas de alta intensidade e curta duração agravam ainda mais os problemas, devido às características do relevo e da rede de drenagem e ao uso e ocupação do solo urbano. O alto número de inundações e a magnitude desses eventos, juntamente com os problemas socioambientais decorrentes da complexa relação entre sociedade e natureza no ambiente urbano, são aspectos considerados na gestão dos riscos (FARIAS e MENDONÇA, 2022).

Os episódios de chuvas extremas que têm ocorrido nas cidades brasileiras também chamam a atenção dos administradores e funcionários públicos, visto que as inundações dos rios urbanos causam sérios danos à população e aos serviços fixados em áreas de risco. Em geral, os desastres que ocorrem nas cidades, estão relacionados ao uso e ocupação do solo e à administração das águas pluviais (FARIAS e MENDONÇA, 2022).

As áreas urbanas, devido à sua composição e padrão de ocupação, resultam em mudanças significativas na paisagem, como a impermeabilização do solo, retificação de rios, remoção de vegetação e aumento populacional, muitas vezes em áreas com relevo íngreme e estruturas precárias sem medidas apropriadas de implantação ou manutenção, estão propensas a eventos ou desastres que causam sérios danos ambientais e à população (DA COSTA, 2022).

As mudanças significativas no uso da terra, que ampliam a divisão social no acesso à terra, habitação e infraestrutura urbana, também podem impactar negativamente a ecologia dos cursos d'água e fomentar a desigualdade social. Afinal, esses projetos não apenas atraem populações de baixa renda para áreas de alto risco de inundação, mas também cobrem extensas áreas com superfícies impermeáveis, interrompendo os fluxos naturais de água e intensificando um uso insustentável das águas subterrâneas (PADAWANGI, 2015).

Quando novas infraestruturas são implementadas, as áreas de terra que supostamente oferecem maior segurança contra inundações atraem projetos

destinados a consumidores de alta renda. Normalmente, pelo fato de a população com maior poder aquisitivo tender a ocupar áreas seguras, ao contrário da população de baixa renda, que vive em regiões de alto risco de inundação (TUCCI, 2012; PADAWANGI, 2015).

Dessa forma, podemos entender que as inundações estão envolvidas no contexto político, tanto em suas origens quanto em suas consequências sociais. Suas origens frequentemente revelam intervenções humanas nos ecossistemas, e seus impactos não afetam igualmente todas as pessoas, mas sim agravam as diferenças sociais, políticas e econômicas, afetando desproporcionalmente os membros mais vulneráveis economicamente da sociedade (TUCCI, 2012; PADAWANGI, 2015).

As inundações urbanas repentinas, como aquelas causadas por enchentes súbitas, desencadeiam efeitos complexos e transitórios, além do transporte de entulhos e objetos, porém, quando ocorrem inundações, com baixa frequência, a população ganha confiança e subestima o risco, levando a investimentos significativos e aumento da densidade populacional em áreas propensas a inundação. Nessa situação, as enchentes se tornam calamitosas (TUCCI, 2012; MIGNOT, 2022).

Percebe-se, então, que a interação entre os subsistemas do ambiente urbano é marcada por conflitos e pressões sociais presentes nas esferas política, econômica e cultural das cidades, muitas vezes motivadas por condições de pobreza e falta de acesso adequado a moradia e infraestrutura (FARIAS e MENDONÇA, 2022).

Muitas vezes, as mudanças estruturais, apresentadas como soluções cientificamente sólidas, ignoram as relações de poder que as incentivam, podendo prejudicar a subsistência das comunidades menos favorecidas e, até mesmo, agravar a degradação ambiental. Visto que as inundações não são causadas apenas pelas mudanças climáticas globais, mas, também, pela densidade habitacional, expressa pela cobertura do solo com materiais impermeáveis, o afundamento das cidades devido à exploração excessiva das águas subterrâneas, o preenchimento de áreas de drenagem natural com construções e as alterações no uso da terra em áreas montanhosas (PADAWANGI, 2015).

O ambiente urbano é um sistema aberto, onde a cidade é resultado de interações entre elementos naturais e elementos efetuados pelo ser humano. Desse modo, o



ambiente no qual a cidade está inserida é moldado pela ação humana em uma determinada área da superfície terrestre (FARIAS e MENDONÇA, 2022).

As consequências da falta de sustentabilidade no crescimento urbano incluem a perda de mananciais, redução da disponibilidade de água potável para a população, aumento dos eventos de inundação, deterioração da qualidade da água nos rios e diminuição de qualidade de vida (TUCCI, 2012).

Em outras palavras, as inundações urbanas são uma realidade comum nas grandes cidades e, caso não sejam tomadas medidas preventivas, espera-se que a frequência desses eventos aumente, devido ao aumento de áreas impermeáveis, a diminuição da capacidade de infiltração da água no solo e a ocupação de áreas de risco (MENDES, 2022).

Em bacias hidrográficas menores, localizadas em áreas urbanas, esses problemas tendem a ser ainda mais acentuados, pois o tempo necessário para a água escoar superficialmente é reduzido e as alterações humanas no uso do solo têm impacto negativo nos processos hidrológicos dessas bacias, contribuindo para a ocorrência de inundações (MENDES, 2022).

Os eventos podem ter origem em condições naturais, como características inerentes que conferem predisposição geológica-geomorfológica e hidrológico-climática, ou em condições antropogênicas, como intervenções sem medidas estruturais e não estruturais de controle, remoção de vegetação, aterramento ou corte irregular de taludes, deposição de resíduos, instalações irregulares ou vazamentos de sistemas de água e esgoto mal dimensionados ou mal instalados (DA COSTA, 2022).

Um dos problemas do monitoramento dos eventos é a escassez de dados observacionais para a avaliação das inundações urbanas, pelo fato desses dados ainda estarem limitados, principalmente, a marcas de água nas fachadas dos edifícios, registradas visualmente logo após o evento de inundação (MIGNOT, 2022).

A modelagem de inundações urbanas é um campo de pesquisa relativamente recente. Embora as inundações urbanas e seus impactos sejam relatados há séculos, as pesquisas dedicadas ao entendimento e modelagem dessas inundações permaneceram insuficientes até o início do século XXI (MIGNOT, 2022).

Uma das alternativas apresentadas atualmente para a gestão de águas pluviais

urbanas é o desenvolvimento de cidades esponja, com o exemplo da China, que manteve um programa entre 2014 e 2020, que se baseava em modificar cidades-modelo com abordagens baseadas na natureza, usando telhados verdes, jardins de chuva, zonas úmidas para absorver, reter e purificar o excesso de água da chuva, entre outros (FU, 2023).

Para tanto, os planejamentos urbanos sustentáveis dependem do mapeamento de áreas sujeitas a inundações. O mapeamento é primordial para a proteção de propriedades e vidas humanas, bem como no gerenciamento dos riscos de desastres (DA COSTA, 2022).

#### 4.2 Planejamento urbano e mapeamento de áreas inundáveis.

O Brasil possui características em comum com outros países da América Latina, no que se refere ao êxodo rural que continua aumentando, taxa de urbanização e desenvolvimento interno prejudicados por questões econômicas, aspectos que ainda foram agravados pela pandemia COVID-19 (SANTOS, 2022; DA SILVA, 2022).

Essas questões demandam especialmente dos poderes públicos (Quadro 1) um planejamento urbano que previna os impactos negativos ao meio ambiente e as populações, pois o aumento da população citadina é associado, entre outras, a uma mudança do uso e cobertura do solo, gestão de esgotos, possível obstrução dos cursos d'água e a ocupação irregular de áreas de proteção permanentes (SANTOS, 2007; MISHRA, SETHI, SIDDIQUE, 2020).

Quadro 1—Gestão das águas urbanas

(continua)

<b>Espaço</b>	<b>Domínio ou titularidade</b>	<b>Responsáveis</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Característica</b>
Bacia hidrográfica (>1000 km <sup>2</sup> )	Estado ou governo federal.	Comitê e agências.	Plano de Bacia.	Gestão da quantidade e qualidade da água nos rios da bacia hidrográfica, sem transferirem impactos.

Quadro 1—Gestão das águas urbanas

(conclusão)

<b>Espaço</b>	<b>Domínio ou titularidade</b>	<b>Responsáveis</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Característica</b>
Municípios (considerando a cidade e as sub-bacias de macrodrenagem (<50 km <sup>2</sup> ))	Município.	Município.	Plano de Saneamento Básico.	Gestão dos serviços de água na cidade e controle dos impactos para jusante na bacia.

Fonte: Adaptado de Tucci, 2012.

O planejamento urbano também está relacionado aos impactos que os eventos extremos, como as secas e cheias, causam nas cidades e na população. Principalmente quanto à precipitação e escoamento, visto que problemas relacionados a alagamentos e inundações podem impactar tanto as estruturas e propriedades, quanto índices de saúde, devido ao aparecimento de doenças e prejuízos alimentares (SANTOS, 2022; MISHRA, SETHI, SIDDIQUE, 2020).

Muito embora exista a necessidade, a maioria das cidades brasileiras não tem estudos suficientes direcionados ao subsídio das medidas preventivas ou solução de problemas já existentes relacionados à drenagem pluvial. Todavia, a recorrência de episódios danosos torna imprescindível a realização de estudos ao decorrer dos perímetros das bacias, bem como planos de ação para socorro da população (ANDRADE, 2014).

De acordo com Tucci (2012), se deve considerar que o planejamento urbano deve contemplar todas as relações que abrangem os sistemas das águas, considerando o uso do solo, onde seria definida a demanda que existem em função da densidade habitacional, uso de áreas impermeáveis particulares ou públicas, áreas de preservação permanentes (APP), entre outros; O abastecimento urbano; sistemas de esgotamentos sanitários ou pluviais; e inundações ribeirinhas que envolvem a ocupação de áreas de risco.

Segundo Fonseca (2023), visando controlar, evitar ou mitigar os impactos que as cheias e inundações podem causar, um planejamento urbano pode contemplar dois tipos de medidas de controle que vão prevenir ou controlar os efeitos sobre a população. Essas medidas podem ser estruturais, que envolvem maiores recursos por se tratarem de infraestruturas que modificam o meio ou medidas não-estruturais, sendo as mais acessíveis por se tratarem de estratégias onde o meio não é modificado (FONSECA, 2023).

Dentre as medidas passíveis de serem adotadas, de modo mais acessível que despenda menos recursos dos municípios, existem os sistemas de previsão de cheias e o mapeamento de área de inundação, que, sendo medidas não estruturais, conseguem reduzir os impactos de cheias tendo em vista a carência por iniciativas de mapeamento e zoneamento de planícies de inundação no país (LARENTIS, 2020; GUTA, 2022).

Estudos, como o de Miola (2013), mostram que, através de uma análise dos fatores que mais influenciam na ocorrência de inundações, como chuva, relevo, etc., é possível produzir informações estratégicas que podem ser utilizadas como embasamento de sistemas de prevenção (MIOLA, 2013).

O tipo de relevo, declividade, solo, além do seu uso e ocupação e práticas de manejo, estão relacionados com o comportamento dos escoamentos em uma bacia hidrográfica. Dessa forma, estudos que visam proporcionar um alerta de enchentes, mapeamento das áreas inundáveis e o comportamento erosivo, são exemplos de aplicações diretas da relação do escoamento superficial direto em uma bacia (CASTRO, 2021).

A análise do comportamento de uma bacia depende, portanto, do uso do modelo hidrológico mais adequado com a mais confiável representação de uma bacia, para uma análise confiável de medidas estruturais e não-estruturais de intervenção, para que se possa minimizar os impactos oriundos de urbanização já existente ou a ser desenvolvida (BARROS, 2007).

Por esse motivo, muitos autores utilizam, em seus estudos, o mapeamento ou zoneamento de planície de inundação como medida não-estrutural de controle de inundações, obtidos a partir de resultados de vazões extremas simuladas com

modelos hidrológicos.(BARROS, 2007).

Uma das primeiras ações possíveis seria delimitar as áreas potenciais de saturação temporária do solo que podem constituir áreas úmidas. Esse mapeamento permitiria a visualização das áreas sujeitas a inundação e consiste em representar um mapa relacionando as informações da cheia com a topografia do terreno (LARENTIS, 2020; GUASSELLI, 2020).

Esses mapas podem ser utilizados tanto no planejamento regional a fim de auxiliar na tomada de decisão relativo à prevenção de cheias, quanto ao nível de planejamento urbano, como um sistema de monitoramento dos eventos extremos, muito embora não existam definições de limites físicos para a zona de passagem da cheia, apenas uma avaliação do que seriam as faixas com maior ou menor probabilidade de inundação, tendo em vista a altura da lâmina d'água ou o tempo de retorno (LARENTIS, 2020).

Outra dificuldade encontrada para que profissionais possam fazer estudos e planejamentos de prevenção de cheias, é a disponibilidade de dados oferecidos pela Agência Nacional das Águas (ANA), que muito embora seja de grande importância e representarem um avanço, muitos pontos de monitoramento não estão ativos ou possuem muitas sequencias de falhas em seus registros (CASTRO, 2021).

#### **4.3 Topografia e modelos digitais de elevação.**

A topografia de uma bacia exerce uma influência significativa nos fenômenos relacionados à água, à geologia e à biologia que ocorrem na paisagem. A disposição espacial das características geográficas, frequentemente, pode ser utilizada como uma maneira indireta de avaliar a variação espacial desses fenômenos, permitindo que sejam cartografados por meio de abordagens simples (MOORE et al., 1991).

A topografia tem grande importância para estimativas de vazão e do tempo de chegada da cheia através dos modelos chuva-vazão, por contribuir com informações da bacia. Uma análise da topografia, juntamente com outros fatores que contribuem para os eventos de cheia, como ações antrópicas e precipitação, podem indicar as áreas vulneráveis a enchentes, denominadas áreas inundáveis (BORGES, 2019).

Considerando que a topografia é a informação necessária para alimentar os modelos hidrodinâmicos, é possível adquiri-la de várias maneiras, seja gratuitamente ou por meio da contratação de serviços de levantamento topográfico em campo. Dependendo do método escolhido, haverá diferentes níveis de resolução espacial e, conseqüentemente, precisão variada (VICENTE, 2022).

A aplicação de modelos digitais de elevação se concentra principalmente na obtenção de informações relacionadas à altitude (como a declividade, sendo um exemplo comum). A obtenção dessas informações é geralmente realizada via operações de vizinhança, como a determinação da declividade, orientação e curvatura do terreno (VALERIANO, 2004).

Em alguns casos, são utilizadas também funções de conectividade, como o cálculo do comprimento da rampa e da área de captação, por exemplo. No entanto, a eficácia dessas operações depende da capacidade de identificar adequadamente as características de interesse, o que é fortemente influenciado pela resolução e precisão dos dados utilizados. Estudos baseados em dados topográficos obtidos por meio de levantamentos de campo demonstraram que a qualidade dos resultados está diretamente relacionada à resolução espacial do modelo (VALERIANO, 2004).

Atualmente, estão sendo desenvolvidos diversos sistemas de geoinformação para armazenar dados topográficos como informações fundamentais na análise de recursos hídricos e questões relacionadas à biologia. Além disso, a topografia desempenha um papel importante na criação de estruturas mais realistas em modelos hidrológicos e de qualidade da água, permitindo representar diretamente o impacto da topografia na hidrologia (MOORE et al., 1991).

Os modelos digitais de elevação são os dados primários utilizados na avaliação da topografia de uma bacia hidrográfica. (MOORE et al., 1991) E os índices topográficos, calculados a partir do modelo digital de elevação do terreno (MDE), vêm sendo integrados em algoritmos computacionais utilizados para simular processos hidrológicos, erosivos e de transporte de poluentes. Esses índices permitem prever, espacialmente, as áreas de acúmulo de umidade em uma bacia hidrográfica, considerando fatores como a orientação do fluxo de água e a inclinação do terreno (MINELLA e MERTEN, 2012).

Atualmente, as mudanças climáticas também devem ser vistas como um impedimento para medições analíticas convencionais, zoneamento e modelos de chuva-vazão que precisam estimar a vazão e a chegada das inundações, afinal, estas precisam ser cada vez mais precisas para evitar desastres (LIMA, 2021).

Dessa forma, se torna essencial a representação matemática do comportamento da geração (hidrológica) e da propagação (hidrodinâmica) do escoamento, sobre as áreas inundáveis, através do uso de softwares que permitem aumentar a capacidade de modelagem (MENDES, 2022; GUTA, 2022).

O SIG, por exemplo, é uma ferramenta necessária na gestão ambiental, para analisar áreas inundadas descrevendo sistemas computacionais que usam dados com referências geográficas, sendo utilizada como um instrumento computacional de geoprocessamento (SOUSA FILHO, 2022).

Os modelos digitais de elevação (MDE), podem ser utilizados como ferramentas que podem contribuir com dados como declividade, comprimento ao longo do escoamento, direção do escoamento, área acumulada de drenagem, rede de drenagem e delimitação da bacia, aprimorando os modelos chuva-vazão, visto que estes utilizam grades para armazenar dados topográficos, comumente definidos por imagens raster, onde cada píxel contém um valor correspondente à altitude local (LIMA, 2021).

De acordo com Pinheiro (2012), os MDEs obtidos por sensoriamento remoto orbital estão disponíveis mundialmente, com grande cobertura de área por cena e baixo custo de processamento, podendo ser úteis na pesquisa hidrológica para delimitar áreas de captação, padrões de drenagem e de escoamento, especialmente em áreas de topografia plana (GUASSELLI, 2020).

O Hidropíxel é um exemplo de modelo chuva-vazão baseado no MDE, ele considera um tempo constante de viagem do escoamento de cada píxel do MDE, sendo baseado na distinção de trechos de escoamento em superfície e em rede de drenagem, dados de rugosidade e declividade, seção transversal e caminhos do fluxo de escoamento. Esse modelo pode ser usado em conjunto ao método SCS-CN que estima a chuva excedente em cada píxel, com informações do uso da terra e tipo de solo (LIMA, 2021).

Os MDEs são muito úteis, contudo, ainda se deve considerar que suas medições de elevação podem conter erros significativos, afinal, as imagens como são recebidas dos satélites, (imagens brutas), podem apresentar degradações radiométricas devidas a desajustes na calibração dos detetores, erros esporádicos na transmissão dos dados, influências atmosféricas, e distorções geométricas (FIGUEIREDO, 2005). Dessa forma, sua utilidade e validade estão relacionadas com a qualidade do modelo original, o que se torna uma questão relevante, tendo em vista que os modelos são distribuídos sem mencionar a proporção do erro ou metodologia aplicada para detecção ou correção (CHAGAS, 2010).

Estudos como o de Guasseli (2020), fazem uma comparação entre o desempenho de imagens de satélite, nesse caso, mostrando que as imagens Alos Palsar I apresentaram pouca eficiência no mapeamento de áreas úmidas, em comparação as imagens SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), que apresentaram um bom desempenho na delimitação de redes de drenagem e áreas de planície de inundação e depressões, dessa forma, se torna necessário avaliar qual material se enquadraria melhor na utilização desejada.

Entretanto, de acordo com Guasseli (2020), atualmente, a maioria das aplicações dos MDEs obtidos a partir de sensoriamento remoto se encontra nos estudos geomorfológicos (GUASSELI, 2020).

A fim de minimizar as incertezas de modelagem, também é necessária a verificação da acuracidade das informações, a redução das dificuldades na representação da diversidade e, principalmente, a variabilidade de parâmetros e variáveis associados aos processos hidrológicos (BARROS, 2007).

Alguns estudos estimam os níveis de inundação com base em cotas conhecidas de eventos de cheia ou em curvas de nível de elevação do terreno (hipsometria), todavia, esses métodos que não utilizam simulação hidráulica para estimativa da cota de cheia, se encaixam melhor em mapeamentos de remansos e estuários, onde a declividade da linha d'água é insignificante. Quando as cotas de cheias não estão relacionadas ao tempo de retorno, o uso dos mapas fica limitado, pois o método não permite o cálculo do risco (LARENTIS, 2020).

Os mapas de risco de inundação são associações de mapeamento de áreas



inundáveis com as informações de danos potenciais, e seu risco é calculado relacionando a vulnerabilidade, referente a ocupação, com a probabilidade de ocorrência, referente aos eventos de cheia, ou ainda, com a cota provável da inundação. E quando esse mapeamento está associado a regulamentação do uso do solo, se denomina zoneamento de áreas inundáveis (LARENTIS, 2020).

De acordo com Larentis (2020), a planície de inundação é dividida em três regiões básicas, que possuem peculiaridades hidráulicas e regulamentação de ocupação particular:

1. Zona de Passagem da Cheia (ZPC) responsável pelo escoamento da cheia, com altas velocidades e maiores profundidades. É proibida a ocupação que ocasione elevação na linha d'água de cheia;
2. Zona de Risco de Inundação (ZRI) é a zona adjacente à ZPC, onde o escoamento é mais lento e menos profundo. É possível a ocupação, desde que tomadas providências para prevenção de inundações;
3. Zona de Baixo Risco (ZBR) é a zona localizada fora da área de inundação para o tempo de retorno estabelecido como base e não necessita de regulamentação específica para proteção contra inundações ribeirinhas.

#### **4.4 Sensoriamento remoto**

De acordo com Melo et al. (2021), os conceitos de fotogrametria e sensoriamento remoto apresentam pontos em comum, todavia, baseado na descrição de Novo (2010), embora não exista uma definição absoluta, é possível encontrar uma descrição para sensoriamento remoto centrada na percepção, compreensão, observação e análise da superfície terrestre, por meio do registro da radiação eletromagnética, permitindo investigações sobre determinados eventos (SILVA, 2023). Dessa forma, uma definição elaborada seria:

Utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou outras plataformas, visando estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir

do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem em suas mais diversas manifestações (NOVO, 2010, p. 28).

As gerações de satélites de sensoriamento remoto passaram por quatro etapas, se iniciando de 1957 a 1972, com o lançamento do satélite russo SPUTNIK-1. Até então, se utilizava de configurações fotogramétricas para o sistema de imageamento; na sequência, entre 1972 a 1986, com o ERST-1 que introduziu novos conceitos, como resolução espacial, temporal, radiométrica e espectral, diversificando as áreas de utilização; seguindo de 1986 a 1999, dando início ao SPOT-1 com o comércio de imagens; e por fim a partir de 1999, com o lançamento dos satélites Ikonos-2 com imagens de alta resolução espacial (LIU, 2006; MELO et al. 2021).

Essa capacidade de obter imagens periódicas do planeta permitiu detectar e monitorar mudanças na superfície terrestre. Esses dados, obtidos por meio de imagens de satélite, fotografias aéreas, mapas, banco de dados ou ainda softwares específicos de geoprocessamento, podiam ser coletados e analisados de maneira rápida a baixo custo e gerar resultados importantes, além de uma melhor manipulação dos dados (SILVA, 2023; BORGES, 2023).

Atualmente, o sensoriamento remoto é amplamente alimentado por imagens obtidas por meio da tecnologia dos satélites orbitais e uma das razões seria que qualquer corpo com temperatura acima do zero absoluto emite energia eletromagnética que permite sua detecção por sensores remotos (SILVA, 2023; FIGUEIREDO, 2005).

A utilização das imagens do sensoriamento remoto, como muitas outras novidades na obtenção e evolução dos sensores de imageamento, foram estimulados pela necessidade da sociedade em resolver conflitos, sejam eles militares, sociais, urbanos, meteorológicos, econômicos, entre outros, permitindo uma visualização da terra, que além de ser uma alternativa econômica, também se dá como uma ferramenta abrangente, que permite o monitoramento de locais de difícil acesso (MELO et al. 2021; SILVA, 2023).

Para uma melhor compreensão do funcionamento do sensoriamento remoto, deve-se entender o conceito de janelas atmosféricas, as quais são faixas de comprimento de onda onde a atmosfera não absorve total ou intensamente a radiação solar,

afinal, são dentro dessas faixas do espectro eletromagnético, onde é possível utilizar o sensoriamento remoto, incluindo, portanto, o visível (0,45 a 0,76  $\mu\text{m}$ ), infravermelho próximo (0,76 a 1,2  $\mu\text{m}$ ), infravermelho de ondas curtas (1,2 — 3,0  $\mu\text{m}$ ), infravermelho médio (3,0 — 5,0  $\mu\text{m}$ ), infravermelho termal (5,0 — 1,0 mm) e Micro-ondas (3,0 — 100 cm) (MENESES; ALMEIDA, 2012).

A distinção de diferentes objetos terrestres sensoreados se dá a partir das diferentes porcentagens de energia refletida em cada comprimento de onda, visto que cada objeto se comporta de maneira diferente espectralmente com a energia eletromagnética incidente. Por esse motivo, é primordial o conhecimento sobre as energias refletidas pelos objetos, para que se possa definir seu comportamento espectral (SILVA, 2023).

Dessa forma, os dados de sensoriamento remoto podem ser utilizados para monitorar mudanças ambientais e avaliar seus efeitos sobre os recursos naturais, a partir da reflectância espectral desses recursos, sejam eles vegetação, solos, minerais, rochas, água, entre outros (SILVA, 2023; BORGES, 2023).

Fornecendo dados repetitivos e consistentes da superfície da Terra, se pode reconhecer uma grande utilidade para diversas aplicações em áreas urbanas, agrícolas, ecológicas, florestais, cartográficas, oceanográficas, hidrológicas, limnológicas militares, etc. (NOVO, 2010).

Imagens de satélite tem características que se distinguem entre si, devido ao tipo de sensor utilizado na sua obtenção. Essas características, denominadas resoluções, podem ser espectrais, espaciais, radiométricas ou temporais. As diferenças se dão no maior detalhamento nas feições identificadas, na capacidade de detectar distintos intervalos do espectro eletromagnético, na periodicidade de obtenção das imagens, ou ainda na quantidade de tons captados a partir de um sinal reconhecido (SILVA, 2023).

De acordo com Silva (2023), são denominadas bandas as camadas de uma imagem de satélite que variam em número e propriedade conforme as resoluções, e cada banda de uma imagem está relacionada a uma medição no espectro eletromagnético, de modo que a resolução espectral melhora conforme o aumento do número de medidas no intervalo de comprimento de onda.

O termo resolução é vasto e utilizado geralmente em referência ao número de píxeis que podem ser exibidos em uma tela, ou a área no solo que um píxel no arquivo da imagem apresenta (PARANHOS FILHO et al., 2021).

De acordo com Paranhos Filho et al. (2021), existem quatro tipos de resolução no que se refere as imagens de satélite, sendo elas:

A Resolução espectral, relacionada ao intervalo de comprimento de ondas do espectro eletromagnético amostrado. De modo que a banda espectral mais estreita significaria a resolução mais alta (LIU, 2006). O estudo das diferentes resoluções espectrais se aplica, por exemplo, para o reconhecimento de variados tipos de cobertura do solo, sendo primordial para esse tipo de informação.

A Resolução espacial é a dimensão do solo representada pelo píxel da imagem, sendo a dimensão do píxel, capaz de delimitar precisamente o alvo observado. Entretanto, não se deve confundir resolução espacial com o menor objeto identificável e tampouco com escala, sendo a proporção entre a distância real e a amostrada em uma carta ou mapa. A resolução espacial é calculada pela distância resolvida na superfície, Ground Resolved Distance (GRD) (LIU,2006). Definida pela equação 1:

$$GRD = \frac{H}{fR 1000} \quad (1)$$

Onde:

H= altitude do satélite em m;

f= comprimento do foco em mm;R= resolução do sistema em Line Pairs per Milimeter (LPM)

Sendo o LPM uma medida-padrão que caracteriza o alvo para a estimativa da resolução de imagem (LIU, 2006).

A Resolução radiométrica, por sua vez, é a quantidade máxima de níveis de informação nos quais a imagem pode ser obtida. Também conhecida como

“amplitude dinâmica” ou “profundidade da imagem”, e por fim;

A Resolução temporal, que se refere ao intervalo de tempo que o satélite leva para obter mais de uma imagem do mesmo ponto. (PARANHOS FILHO et al. 2021)

Silva (2023) ressalta que, para decidir sobre a escolha de uma imagem, três resoluções devem ser consideradas: espectral, radiométrica e espacial, contudo as características variáveis entre as resoluções de distintas imagens de satélite não indicam necessariamente maior ou menor qualidade, mas sim fatores que devem ser avaliados para definir o que melhor se enquadra. Dessa forma, se entende que para trabalhar com sensoriamento remoto é necessário escolher entre parâmetros, os que melhor atendem os objetivos propostos para a utilização de uma imagem de satélite (SILVA, 2023).

Após serem definidos os parâmetros adequados para o estudo, se torna necessário avaliar a qualidade dos dados, visto que o produto do sensoriamento remoto por ser prejudicado pela presença de nuvens e fenômenos atmosféricos ou ainda a incompatibilidade de imagens de diferentes datas, ou sensores (SILVA, 2023).

Exemplos de aplicações, como os estudos que visavam a delimitação de área sazonalmente inundada por meio de imagens de sensoriamento remoto, associada ao uso de geotecnologias, como Silva (2023), Santos (2022), Queiroga (2023), e Gomes (2023), se mostraram eficientes e demonstram que as imagens de satélites possibilitam entender a distribuição, realizar acompanhamentos sistemáticos e acrescentar os dados com outras demandas de análises de diversos enfoques acadêmicos, colaborando com trabalhos de controle e fiscalização e sendo possível serem aplicadas em regiões que necessitam de estudos dessa natureza.

Possivelmente, as imagens de satélite dependam de correções atmosféricas para que se otimize os dados obtidos em séries temporais pelas imagens serem produto de uma mistura de sinal da superfície com a passagem por uma atmosfera dinâmica que é variável e, portanto, podem apresentar distorções em valores de píxeis de datas diferentes (MARTINS et al. 2017).

Como mostra o estudo de Martins et al. (2017), visando analisar o resultado da correção atmosférica de imagem dos satélites Landsat-5 e Landsat-8, para o mapeamento temporal do uso e cobertura do solo, que mostrou que os dados das

imagens corrigidas contribuem para que os mapeamentos de uso e cobertura do solo ao longo do tempo possam ser comparados entre si e dados das imagens corrigidas representam um comportamento mais acurado dos elementos imageados.

#### 4.4.1 SRTM

O levantamento realizado pela SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) ocorreu entre 11 e 22 de fevereiro de 2000, com uma média de 16 órbitas diárias e um total de 176 órbitas. Durante esse período, foram coletados 12 TB de dados para serem processados e utilizados para a criação de Modelos Digitais de Elevação (VALERIANO, 2004).

O processamento dos dados planeja gerar um MDE abrangendo todo o mundo, com a elaboração sendo conduzida continente por continente, começando pela América do Norte. Após a conclusão de cada continente, os dados são enviados para o NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), onde são editados, verificados e ajustados conforme os padrões de precisão de mapas norte-americanos (*National Map Accuracy Standards*). Esses mapas são então devolvidos à NASA para distribuição pública através da USGS (*United States Geological Survey*) (VALERIANO, 2004).

De acordo com Valeriano (2004), uma característica indesejável desses dados é sua sensibilidade a objetos presentes na superfície do terreno, como antenas, edifícios e variações na cobertura vegetal. Embora esses objetos façam parte da superfície terrestre, sua inclusão no modelo dificulta a visualização adequada do terreno em si, o que é essencial para obter informações topográficas. Filtros como a média e passa-baixa podem minimizar esses efeitos, mas também suavizam indiscriminadamente o relevo, sem distinguir entre artefatos e características reais (VALERIANO, 2004).

Inicialmente, os dados processados pela NASA foram disponibilizados com uma resolução espacial de 90 m e, a partir de 2014, passaram a ser disponibilizados com uma resolução espacial de 30 m (VICENTE, 2022).

A missão SRTM foi uma iniciativa crucial na geração de um MDE global para a superfície terrestre. Seu objetivo era coletar dados topográficos utilizando a técnica interferométrica SAR (inSAR) a bordo do ônibus espacial Endeavour (ALVES, 2015).

Foi criado um banco de dados topográficos chamado TOPODATA, que utiliza os dados do MDE-SRTM para o território brasileiro, com o intuito de melhorar a precisão dos dados topográficos originais de resolução espacial de 90 m. Através de técnicas geoestatísticas, foi possível gerar um MDE com uma resolução espacial mais refinada, de 30 m. Os algoritmos foram aplicados para derivar variáveis geomorfométricas relevantes em estudos morfológicos e morfométricos, como declividade, orientação de vertentes e curvatura vertical e horizontal (ALVES, 2015).

#### **4.4.2 ALOS PALSAR**

Os dados dos modelos digitais de elevação ALOS PALSAR foram obtidos através do sensor PALSAR, que faz parte do satélite Advanced Land Observing Satellite (ALOS-1), uma missão organizada pela Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) e pela Japan Resources Observation System Organization (JAROS) (ALVES, 2015).

A missão tinha como objetivo fornecer imageamento consistente em termos de espaço e tempo em escalas continentais com alta resolução, utilizando a técnica InSAR. A resolução espacial das imagens variava entre 10 m e 100 m, com um ângulo médio de incidência de 34,3°. As imagens disponibilizadas pelo banco de dados do Alaska Satellite Facility (ASF) têm uma resolução espacial de 12,5 m (ALVES, 2015).

O sensor PALSAR era o único sistema SAR a bordo do satélite Advanced Land Observing Satellite (ALOS-1). A plataforma foi lançada em 24 de janeiro de 2006, pela Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) e pela Japan Resources Observation System Organization (JAROS) (ALVES, 2015).

#### **4.5 Filtros Digitais**

Com a ampliação do monitoramento, foram criados filtros digitais que podem ser utilizados em todos os tipos de bacias hidrográficas, devido a sua ampla aplicabilidade (CASTRO, 2021).

Para uma obtenção de maior confiabilidade do MDE, é necessário que os dados sejam submetidos a um processo de filtragem, afinal, os dados podem possuir informações de elevações do terreno e de objetos existentes sobre ele (MIRANDA, 2018).

Os filtros suavizam ou aprimoram os detalhes da imagem, facilitando os esforços de interpretação, automatizando o processo de mapeamento e até minimizando os efeitos do ruído. Na filtragem espacial, por exemplo, o nível de cinza de um píxel, após a modificação, depende do nível de cinza desse ponto e dos níveis de cinza de outros píxeis próximos a esses pontos (OLIVEIRA et al. 2020).

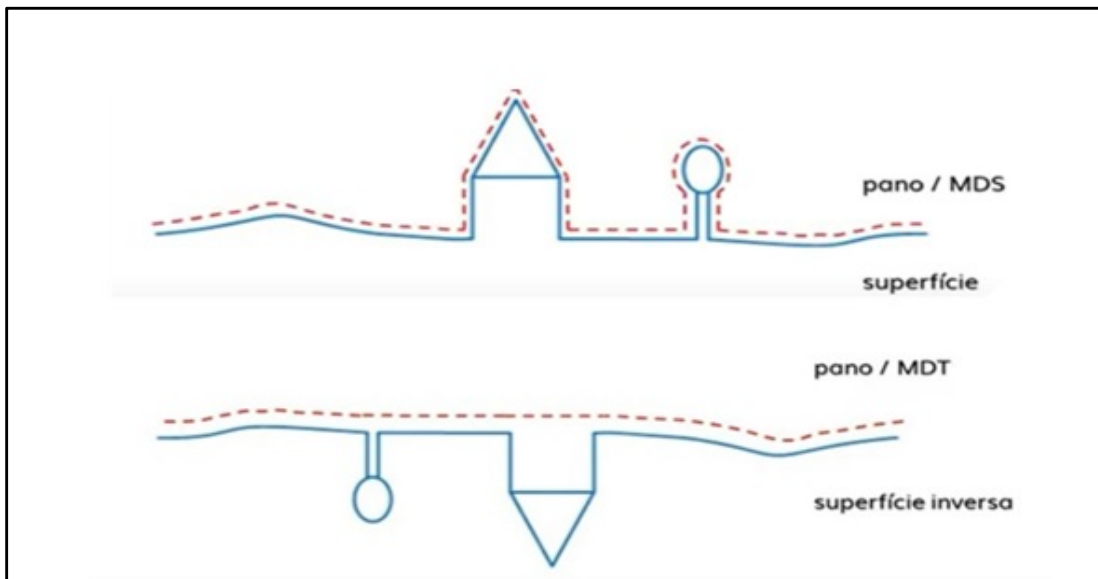
Em um MDE, a filtragem detecta e elimina os pontos que não são desejáveis para o modelo, como: vegetação, construções e outros objetos elevados. Portanto, o processo de filtragem trata-se de um pós-processamento a ser realizado a fim de refinar os dados e obter a representação do terreno desejada (MIRANDA, 2018).

O filtro a ser utilizado nesse estudo, denominado CSF (filtro de simulação de pano), está disponível em um software de código aberto, foi testado em estudos que revelam sua eficácia, e mostram que o parâmetro de resolução da grade, que o algoritmo CSF proporciona, é importante na delimitação do terreno e determina mais pontos no solo com valores baixos ao trabalhar em uma área íngreme e inclinada (JAEBIN LEE, et al. 2020; KARAKASA, 2020).

A figura 01 ilustra o funcionamento do filtro CSF, que simboliza um pano que por força gravitacional recai sobre a superfície, delimitando a silhueta horizontal considerando os elementos nela presentes. Dessa forma, com a inversão da superfície e um pano rígido sendo usado para cobrir a superfície invertida, se pode obter uma visualização mais clara do que realmente representa o terreno selecionado, e não os elementos encontrados em sua superfície (ZHANG, 2016).



Figura 1— Aplicação do Filtro CSF/Cloud Compare



Fonte: Adaptação de Zhang et al., 2016.

A geração do MDT com o filtro CSF/Cloud Compare, pode seguir um passo a passo demonstrado por tutorial do próprio software:

1. Importação de nuvens de pontos;
2. Consulta das propriedades dos pontos;
3. Transformação da nuvem para mesh;
4. Suavização da geometria;
5. Amostragem de pontos;
6. Filtragem de pontos (Filtro CSF);
7. Transformação para Raster;
8. Visualização dos resultados.

#### **4.6 HEC-RAS**

As previsões de cheias em rios, comumente, são realizadas usando um protocolo de duas etapas: inicialmente o roteamento da inundação é feito a partir da utilização de modelos hidrológicos e, em seguida, os picos de inundação resultantes são, então, convertidos para previsões de nível de água usando modelos hidráulicos de fluxo constante, como o HEC-RAS (HICKS, 2005).

O HEC-RAS (River Analysis System) é um sistema integrado, projetado para usos em ambientes multitarefas. Composto por uma interface gráfica, recursos de armazenamento e gerenciamento de dados, componentes separados de análise hidráulica, entre outros (BRUNNER, 2002).

Este software comporta trabalhos diversos, incluindo descobrir informações geográficas, criar e usar mapas, extrair propriedades geométricas, reunir dados geográficos e análise de mapas. O modelo foi atualizado para facilitar as análises de fluxo instáveis e quando necessário, rotear inundações em águas abertas simples, produzindo previsões de nível da água paralelamente. Sendo possível, portanto, estendê-lo a aplicação de previsão de cheias (HICKS, 2005).

Se trata de um modelo hidráulico popular para o desenvolvimento de mapas de várzea, tendo sido utilizado em diversos trabalhos com objetivo de mapeamento de inundação (PRADHAN, 2022; NAMARA, 2022, ARASH, 2023; ALIPOUR, 2022; ATHIRA, 2022, MENDES, 2022).

#### **4.7 Modelo HAND**

O algoritmo HAND (Height Above de Nearest Drainage), traduzido por “altura acima da drenagem mais próxima”, é um exemplo de modelo cujo objetivo é mapear as áreas suscetíveis a inundação, bem como mapear a condição hidrológica estacionária do terreno. Desenvolvido no Brasil, através dos institutos de pesquisas INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia) (NOBRE, 2011; MOMO, 2016; MILANESI, 2017).

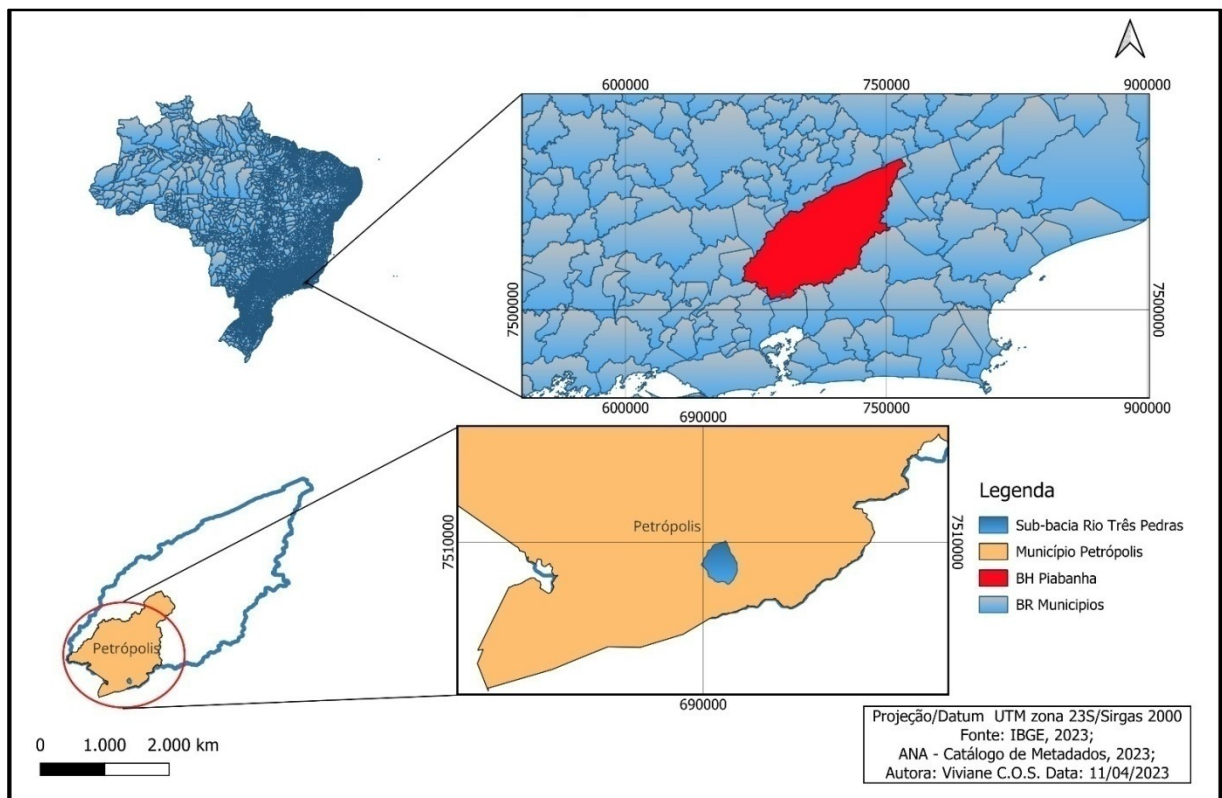
O modelo realiza a normalização da paisagem em relação à rede de drenagem usando dois conjuntos de etapas em um Modelo de Elevação Digital (DEM). Ele consegue identificar e antecipar áreas com relevância hidrológica significativa, com

base na distribuição normalizada dos potenciais gravitacionais relativos e já alcançou visibilidade internacional no campo da hidrologia e gestão de risco (NOBRE, 2011; MILANESI, 2017).

#### 4.8 Caracterização da área de estudo

Localizada na Bacia Hidrográfica Piabanha, a sub-bacia do Rio Três Pedras (Figura 2), se encontra na região do município de Petrópolis — RJ. As coordenadas dos pontos de suas extremidades são: leste -43.15367,-22.51592; Oeste -43.13646,-22.51631, Norte -43.14230,-22.50526 e Sul -43.14084,-22.52450, segundo o georreferenciamento feito a partir das bases cartográficas do IBGE e MDE obtido através do ALOS Palsar.

Figura 2—Localização da Sub-bacia do Rio Três Pedras



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

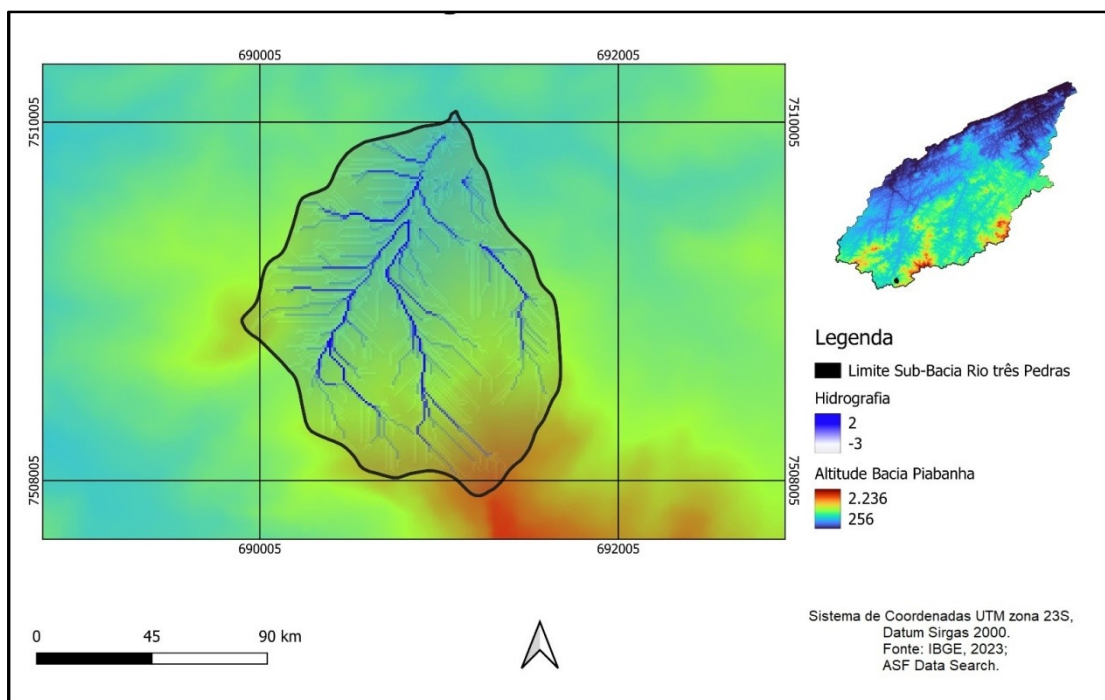
A ocupação da região se iniciou no período colonial, no início do século XIX. Por conta da proximidade com a capital do Brasil na época (Rio de Janeiro), uma

ocupação que ocorreu de maneira rápida e desordenada para as características ambientais da região (LOU, 2010).

Os principais núcleos urbanos da região são Petrópolis e Teresópolis, cidades inseridas em uma região entre montanhas, nos vales, com pequenos terraços fluviais dos rios, expandindo-se pelos vales do Rio Piabanha e Preto. Sendo a área urbana formada por áreas ocupadas por construções e sistema viário(LOU, 2010; COSTA, 2017).

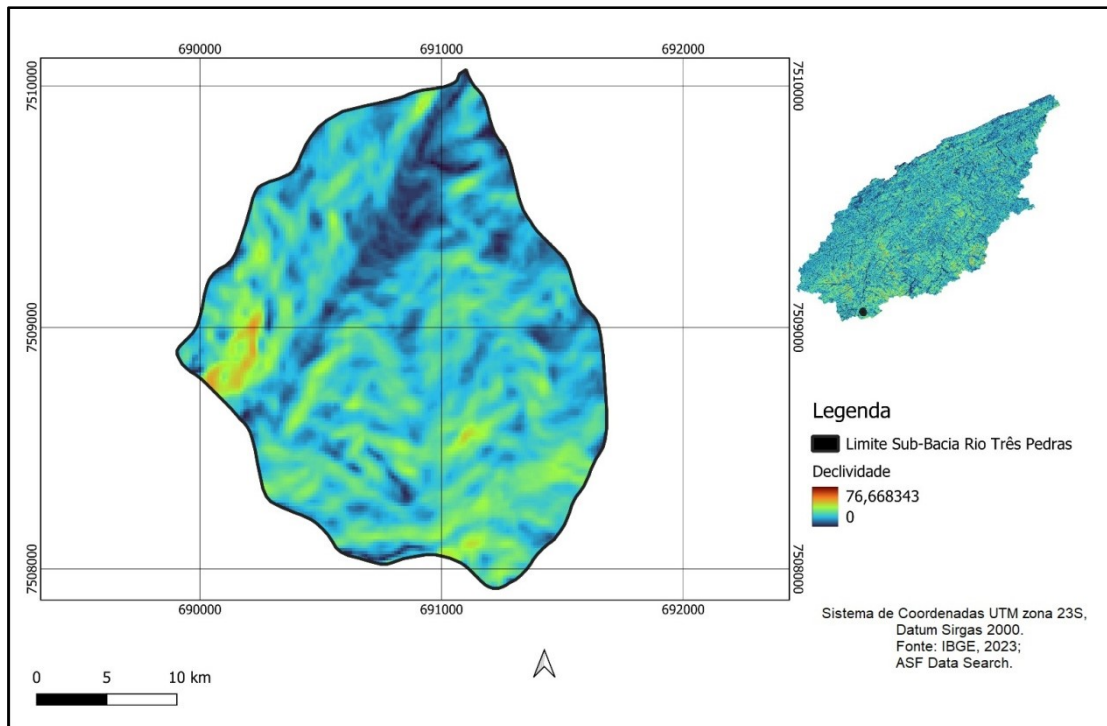
Através do software de geoprocessamento QGIS 3.26.3 e com o modelo digital do terreno (MDT) gerado, foi possível construir mapas de altitude e hidrografia e declividade da sub-bacia de interesse (Figuras 3 e 4).

Figura 3—Altitude e hidrografia sub-bacia do Rio Três Pedras



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Figura 4—Declividade sub-bacia do Rio Três Pedras



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

A região onde se localiza a sub-bacia, devido a sua proximidade da superfície oceânica, associados a mecanismos dinâmicos de massas de ar polares, oceânicas, linhas de instabilidade e fatores estáticos orográficos proporcionados pela orientação SO/NE da Serra do Mar, culminam numa elevada pluviosidade da região. (LOU, 2010)

As características climáticas da região serrana são tropicais de altitude úmidas e, devido à altitude acima de 500 metros, apresenta predomínio de temperaturas amenas, com temperatura média entre 10 e 15 °C ao redor dos municípios de Teresópolis e Petrópolis (ALVIM, 2016; SANTOS, 2022).

O período considerado chuvoso se concentra entre os meses de outubro e março, com precipitações médias de 160 mm. O maior índice ocorre no mês de dezembro com média variável entre 220 – 450 mm e janeiro 235 – 473 mm, enquanto nos outros períodos a média é de 100 mm (COSTA, 2017; SANTOS, 2022).

O quadro a seguir (quadro 2), apresenta os maiores registros de cheias no município de Petrópolis, onde se localiza a sub-bacia do Rio Três Pedras, e arredores. Assim como as figuras 5 e 6, tem o objetivo de ilustrar a gravidade dos problemas com

cheias e inundações a que estão submetidas as populações da localidade, principalmente durante os meses em que ocorrem os maiores índices pluviométricos.

Quadro 2 — Registros de ocorrência de grandes enchentes em Petrópolis.

(continua)

<b>Data da Ocorrência</b>	<b>Descrição</b>
Janeiro de 1966	Enchentes e deslizamentos nos estados da Guanabara e Rio de Janeiro deixam 250 mortos e 50.000 desabrigados.
Janeiro de 1967	Enchentes e deslizamentos, nos estados da Guanabara e Rio de Janeiro, totalizam 300 mortos e 25.000 feridos.
Fevereiro de 1987	Enchente em Petrópolis, Teresópolis e Rio de Janeiro, totalizam 292 mortos e 20.000 desabrigados. Em razão dessas chuvas, que registraram 171 vítimas em Petrópolis e 94 no município do Rio de Janeiro, foi decretado nesta o estado de emergência e, com o agravamento da situação, no dia 22, foi decretado estado de calamidade pública.
Fevereiro de 1988	Enchente em Petrópolis e Baixada Fluminense, com 277 mortos e 2.000 desabrigados.
Janeiro de 1999	Enchente no Rio de Janeiro e municípios do Vale do Paraíba e região Serrana, com 41 mortos, 72 feridos e 180 famílias desabrigadas.
Janeiro de 2000	Enchente nos municípios do Petrópolis, Teresópolis, Casimiro de Abreu e Barra Mansa, com 22 mortos, 60 feridos e 133 famílias desabrigadas.
Fevereiro de 2003	Enchente nos municípios da região Serrana, Sul e norte Fluminense, com 36 mortos, 95 feridos, 870 desalojados e 823 desabrigados.
Fevereiro de 2008	Nove pessoas morrem em Petrópolis, na região serrana do Rio de Janeiro, em decorrência de fortes chuvas.
Janeiro de 2011	Enchente na região Serrana deixa mais de 900 mortos e quase 100 desaparecidos. Considerada a maior tragédia climática da história do Brasil. Os municípios mais afetados foram Nova Friburgo, Petrópolis e Teresópolis.

Quadro 2 — Registros de ocorrência de grandes enchentes em Petrópolis.

(conclusão)

Data da Ocorrência	Descrição
Março de 2013	Enchente deixa mais de 10 mortos em Petrópolis.
Fevereiro de 2022	Com 178 mortos, tragédia em Petrópolis é a maior já registrada na história do município.

Fonte: Atualizado de Lou, 2010.

Figura 5—Movimento de massa causado pelas chuvas na cidade de Petrópolis — RJ



Fonte: Agência Brasil, 2022.

Figura 6 —Inundação no centro histórico da cidade de Petrópolis — RJ



Fonte: Folha de S. Paulo, 2022.



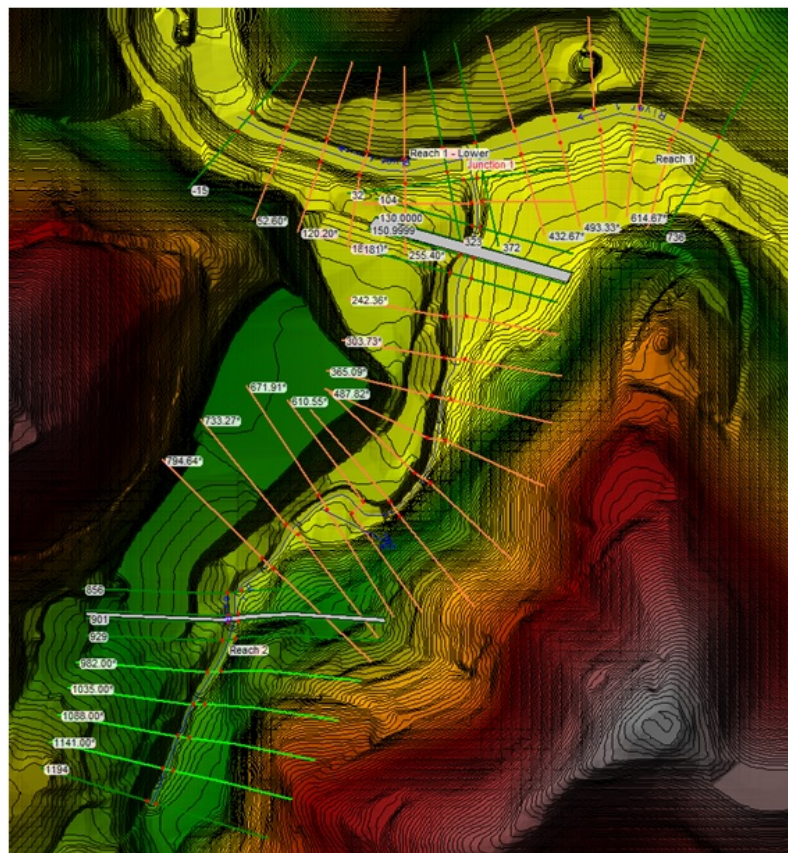
## 5. METODOLOGIA

### 5.1 Modelagem

A modelagem original utilizada como referência de comparação, disponibilizada por pesquisadores que atuaram no comitê da bacia hidrográfica Piabanha, é possível de ser localizada nos acervos do comitê, e se trata da modelagem da planície de inundação, durante um evento ocorrido em março de 2018, da área de maior concentração da população que ocupa as margens do Rio Três Pedras, que sazonalmente enfrentam problemas com inundações.

O MDT da modelagem de referência foi obtido através de um raster referente a área (Figura 7), com resolução espacial de 0,5 m, onde foi feita uma interpolação utilizando os dados topográficos vetoriais (Curvas de Nível) da base cartográfica da cidade de Petrópolis (escala 1:2.000). Essa base cartográfica é disponibilizada gratuitamente através do site da prefeitura de Petrópolis (GOUVEA, 2018).

Figura 7—Representação da geometria vetorial



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

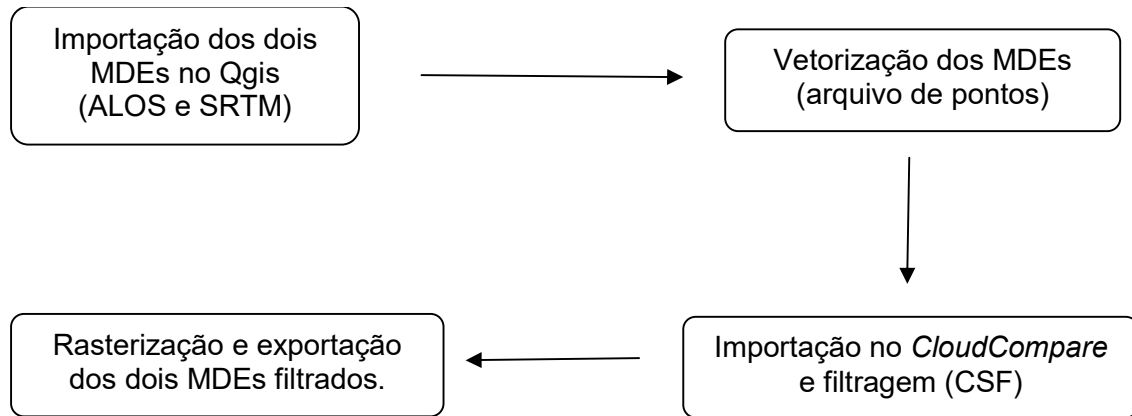
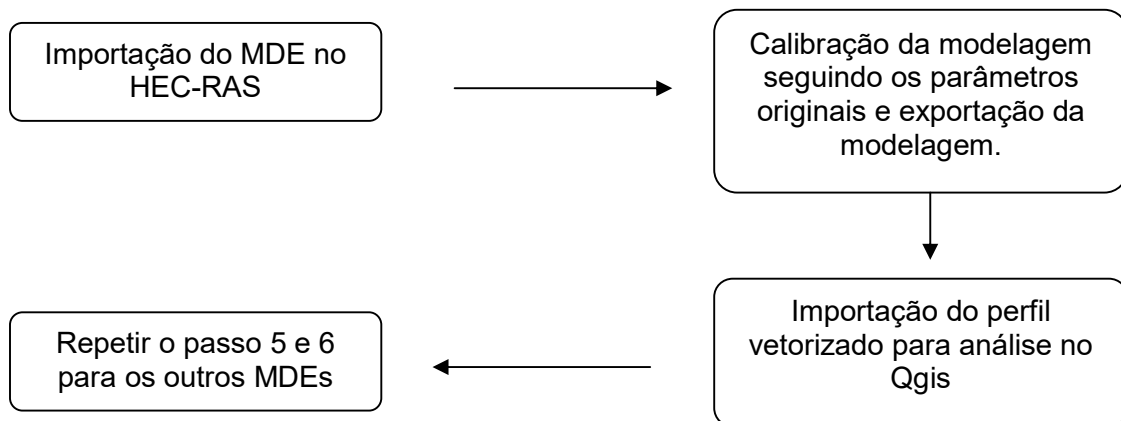
O MDE SRTM foi obtido inicialmente de duas fontes, sendo elas o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), e também TOPODATA, com variação de resoluções. Entretanto, durante uma primeira análise, a imagem com resolução de 30 m, obtida através do TOPODATA apresentou falhas na região de interesse.

Dessa forma, a definição se deu pelo MDE disponibilizado diretamente pela NASA onde foi selecionada a área de interesse usando uma poligonal. A resolução espacial da imagem foi de 30 m × 30 m, utilizando o Sistema de Referência Geográfico DATUM WGS 84. Posteriormente, essas imagens foram reprojadas para o Sistema de Referências UTM Fuso 23 S, utilizando o Datum SIRGAS 2000.

O MDE ALOS PALSAR foi obtido no banco de dados Alaska Satellite Facility — Data Search, Alos Palsar I MDE (12,5 m), com polarização HH. A bacia hidrográfica foi delimitada sobre o MDE como a região de interesse. Após download, as imagens também foram reprojadas para o Sistema de Referências UTM Fuso 23 S, Datum SIRGAS 2000. A folha AP\_04215\_FBS\_F6720\_RT1 foi utilizada para contemplar a região da bacia para compor o Modelo Digital de Elevação (MDE) das áreas de estudo.

O fluxograma a seguir (figura 8), ilustra o procedimento metodológico que consistiu em oito etapas, que depois serão descritas e detalhadas.

Figura 8—Etapas de processamento MDEs

**Geração de MDEs Filtrados:****Modelagem e Análise:**

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Os Modelos digitais de elevação, obtidos através das imagens de satélite, foram importados ao software Qgis onde passaram inicialmente por um processo de correção de falhas.

Os MDEs foram convertidos para nuvem de pontos no software Qgis e, em formato Shapefile, foram submetidos a uma filtragem no software CloudCompare, com o filtro CSF, conforme o tutorial descrito anteriormente. Dessa forma, dois novos arquivos de formato raster foram estabelecidos, a fim de serem importados para o software HEC-RAS como modelos filtrados.

Os quatro modelos de elevação, filtrados e não filtrados, foram inseridos no software HEC-RAS, seguindo os mesmos parâmetros estabelecidos na modelagem original, para refazer a modelagem alterando apenas o arquivo de entrada.

Após a importação do MDE obtido por meio de sensoriamento remoto, para o HEC-RAS, a calibração do modelo foi feita a partir dos parâmetros do modelo original de geometria do rio, coeficiente *n* de Manning, fluxo de projeto, perfis e upstream e downstream.

Foram inseridas seções transversais no trecho do rio onde possui uma curva sinuosa, dessa forma, mais seções transversais pode ser considerada em todos os cenários de modelagem, incluindo o original de referência.

Os dados de geometria foram exportados do modelo original, considerando suas cotas e *bank lines* e, posteriormente, inseridos nos modelos de avaliação.

Os valores do coeficiente de *Manning* foram retirados do manual de referência, considerada a sub-bacia como: A- *Natural streams*; 1- *Main Channels*; B- *Same as above, but more Stones and weeds*. Dessa forma, tendo os valores 0.030 (Mínimo), 0.035 (Normal) e 0.040 (Máximo).

Para os dados de fluxo constante foram seguidos os 12 perfis (quadros 3 e 4) estabelecidos pelo modelo original, bem como suas condições de limite.

Quadro 3—*Steady Flow Data*

<b>Profile Names and Flow Rates</b>											
<b>PF1</b>	<b>PF2</b>	<b>PF3</b>	<b>PF4</b>	<b>PF5</b>	<b>PF6</b>	<b>PF7</b>	<b>PF8</b>	<b>PF9</b>	<b>PF10</b>	<b>PF11</b>	<b>PF12</b>
5	5	5	5	23.5	46.7	69.7	79.6	65.7	51.8	37.8	23.9
6	6	6	6.6	43.3	84.3	124.6	138.6	113.7	88.8	63.9	39.2
1	1	1	1.6	19.8	37.6	54.9	59.1	48.1	37	26	15.3

Quadro 4—*Boundary Conditions*

UPSTREAM	DOWNSTREAM
Normal Depth S = 0.00003	Junction = Junction 1
Junction = Junction 1	Normal Depth S = 0.00109
Normal Depth S = 0.04697	Junction = Junction 1

O comportamento e o desempenho dos quatro panoramas de reconstrução dos MDEs foram avaliados mediante comparação da saída da modelagem hidráulica da enchente com a saída do modelo de referência.

A avaliação do desempenho do MDE na modelagem do mapa de inundação foi feita a partir da comparação dos dados de medição de área individual e em sobreposição com o modelo original e usando os índices estatísticos.

## 6. Análises

A análise comparativa entre os levantamentos foi feita no QGis, por se tratar de um software multiplataforma de sistema de informação geográfica (SIG), considerada uma ferramenta de extrema importância que permite análises de várias épocas a partir de diferentes dados (imagens orbitais, fotografias aéreas convencionais e fotografias obtidas por VANT) e por se tratar de um software livre com código-fonte aberto, que permite visualizar, editar e analisar dados georreferenciados, sendo possível aplicá-lo ao objetivo de comparar os resultados referentes às coordenadas (VILLALTA, 2020).

Através da sobreposição de imagens orientada pela base de dados provenientes da modelagem disponibilizada pelo comitê da bacia hidrográfica, foi possível analisar as incertezas da modelagem de cheias por meio de sensoriamento remoto.

Segundo Momo (2016) e Arash e Yasi (2023), para avaliação do desempenho dos modelos, pode-se utilizar a aplicação de variáveis que determinam o acerto, a omissão e a comissão. Sendo o acerto, as áreas coincidentes; omissão, as áreas inundáveis não consideradas pelo modelo; e comissão, são áreas que o modelo aponta como inundáveis, erroneamente (MOMO, 2016).

A análise inicial foi realizada através da sobreposição de modelagens no software Qgis, para obtenção das áreas em acerto. Se trata de uma medição de áreas sobrepostas, delimitadas pelas duas modelagens em comparação. Dessa forma, se pode observar quais modelos possuem maiores áreas em comum com o modelo de referência.

Na sequência, se pode avaliar as áreas em erro ( $M^2$ ) apresentadas na comparação das modelagens. Se trata do erro de comissão de área, ou seja, áreas simuladas como inundáveis, erroneamente. A fim de observar qual modelagem apresenta maior área fora da delimitação do polígono original.

A terceira análise se trata de obter o ponto de maior erro distancial entre os modelos, isto é, analisar o ponto mais distante, na modelagem simulada, em comparação ao mesmo ponto na modelagem de referência e avaliar qual modelagem apresenta o maior erro distancial.

Nesse estudo, as variáveis aplicadas serão: índice F ou F estatístico; acurácia Geral; FIT (%) e Taxa de alarme falso (TAF), que utilizam os seguintes critérios:  $A_o$  se refere a área de inundação do modelo de referência;  $A_s$  refere-se à área de inundação simulada;  $A_{os}$  corresponde à área de sobreposição de  $A_o$  e  $A_s$  (MOMO, 2016; ARASH e YASE, 2023).

De acordo com Arash e Yasi (2023), para avaliar estatisticamente a discrepância entre o mapa de referência e as áreas de inundação obtidas, é possível aplicar a equação (2) do Índice F de mapeamento de cheias, ou F estatístico:

$$F(\%) = 100 \left( \frac{A_{os}}{A_o + A_s - A_o} \right) \quad (2)$$

O F varia entre 100 e 0, correspondendo a uma combinação perfeita e uma condição sem correspondência, respectivamente. São consideradas áreas de acerto as áreas coincidentes no mapa de referência e no mapa simulado. Portanto, são as áreas onde o modelo prevê corretamente as áreas de inundação (MOMO, 2016).

A Acurácia Geral representa a relação entre a área de acerto simulada e a área total observada. Este parâmetro tem valor zero quando não há sobreposição e 100 quando as áreas coincidem perfeitamente (MOMO, 2016).

Expressa pela equação (3):

$$AG = \frac{AoS}{Ao} \times 100 \quad (3)$$

A equação (4), representa a variável FIT (%) que se dá pela relação entre o número de píxeis combinantes nas áreas de inundação observadas e simuladas, e a soma das duas áreas (simuladas e observadas). Variando de 0 a 50 (MOMO, 2016).

$$FIT (\%) = \frac{AoS}{Ao+A} \times 100 \quad (4)$$

Por fim, a taxa de alarme falso (TAF), avalia o rendimento do modelo em relação aos erros de comissão, ou seja, o percentual de área simulada como inundável, erroneamente. Dessa forma, quanto mais próximo de zero, o resultado, melhor o desempenho do modelo (MOMO, 2016).

Representada pela equação (5):

$$\frac{As - As \cap Ao}{As} \times 100 \quad (5)$$

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

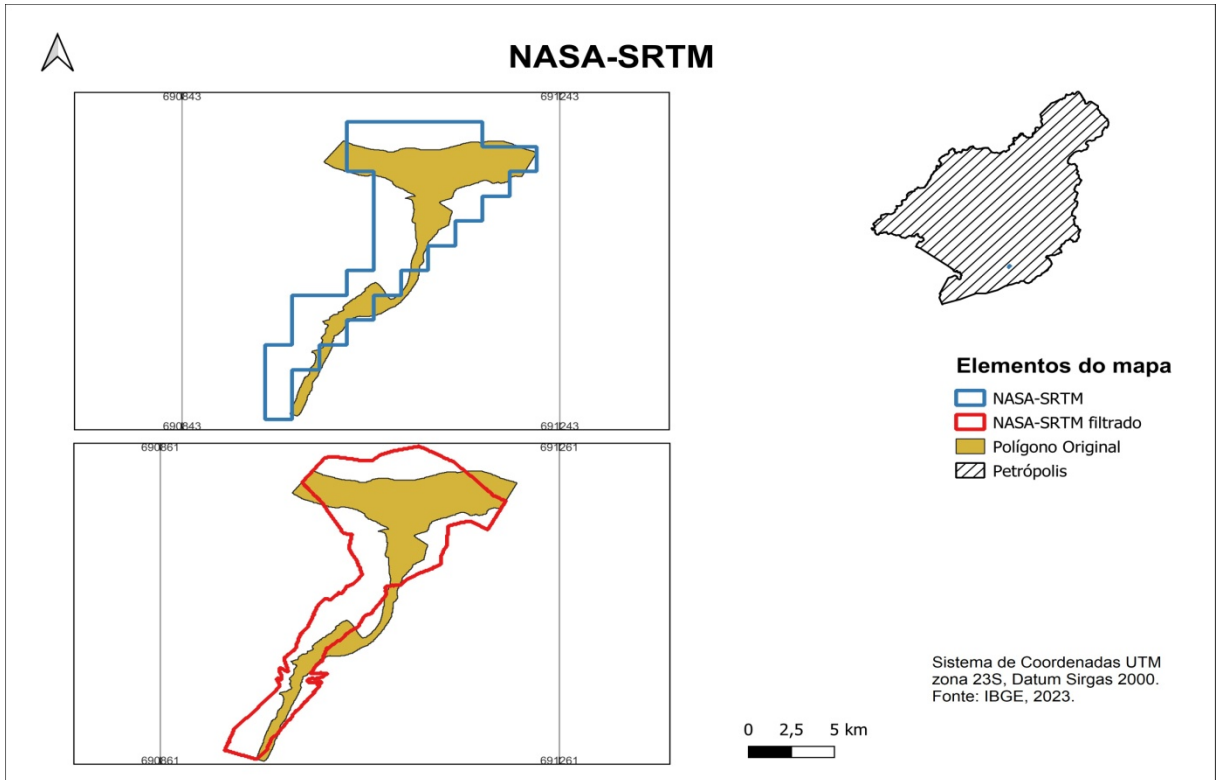
Ao analisar os dados obtidos pelo levantamento remoto para a modelagem de inundação da área estudada, se pôde aplicar uma análise gráfica e estatística que apresenta o grau de incerteza avaliado nas diferentes metodologias para pautar as discussões (ARASH e YASE, 2023).

Para a importação dos modelos para o software Qgis, foram selecionadas no software HEC-RAS, a modelagem denominada como perfil oito (PF8), dos quatro MDEs simulados e também do original, a fim de serem sobrepostos, esse perfil em todas as modelagens representava o momento de maior cheia na localidade.

O polígono de referência foi sobreposto por cada um dos polígonos gerados pelos modelos digitais gerando os mapas de comparação (figura 9 e 10) e, a partir desse cenário, foi possível obter os dados para as análises gráficas e estatísticas, sendo a metodologia de análise e comparação de mapas seguindo estudos de SPÖRL (2004); SOUSA (2012) e MARTINS (2022).

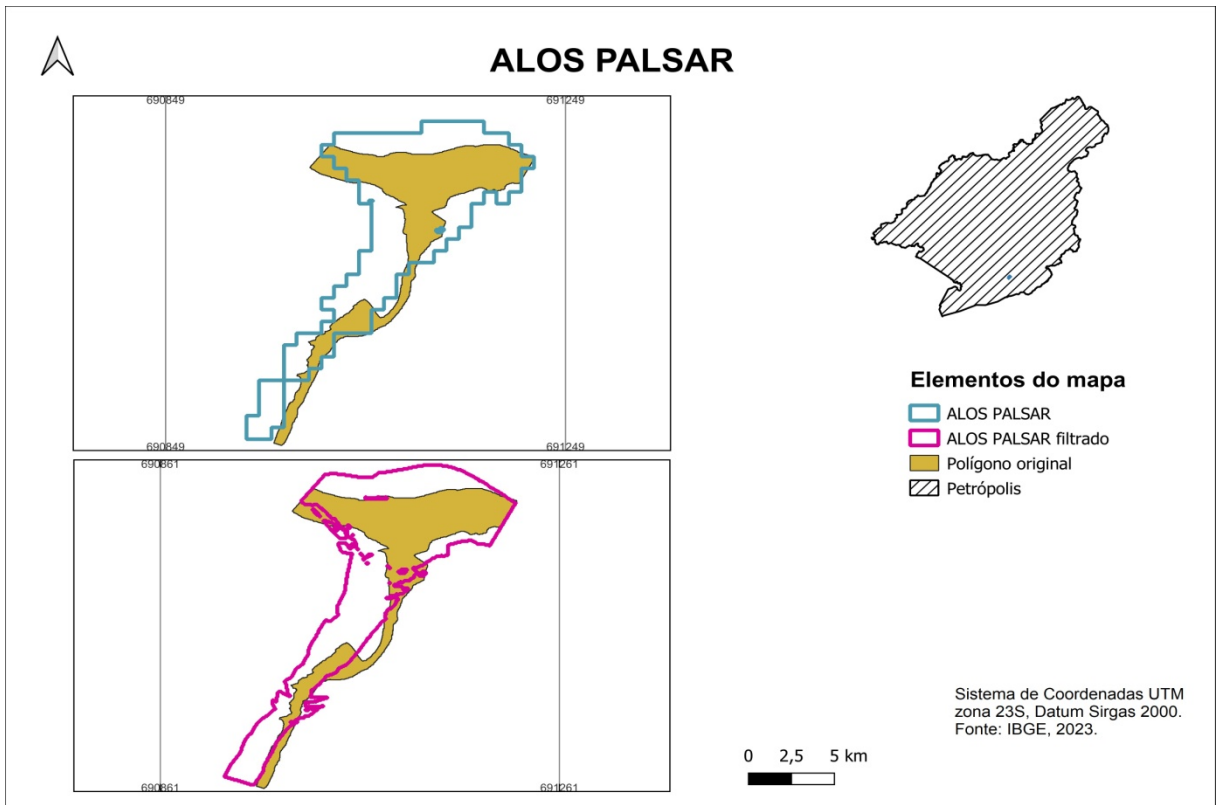


Figura 9—Comparação SRTM e modelo original



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Figura 10—Comparação ALOS e modelo original



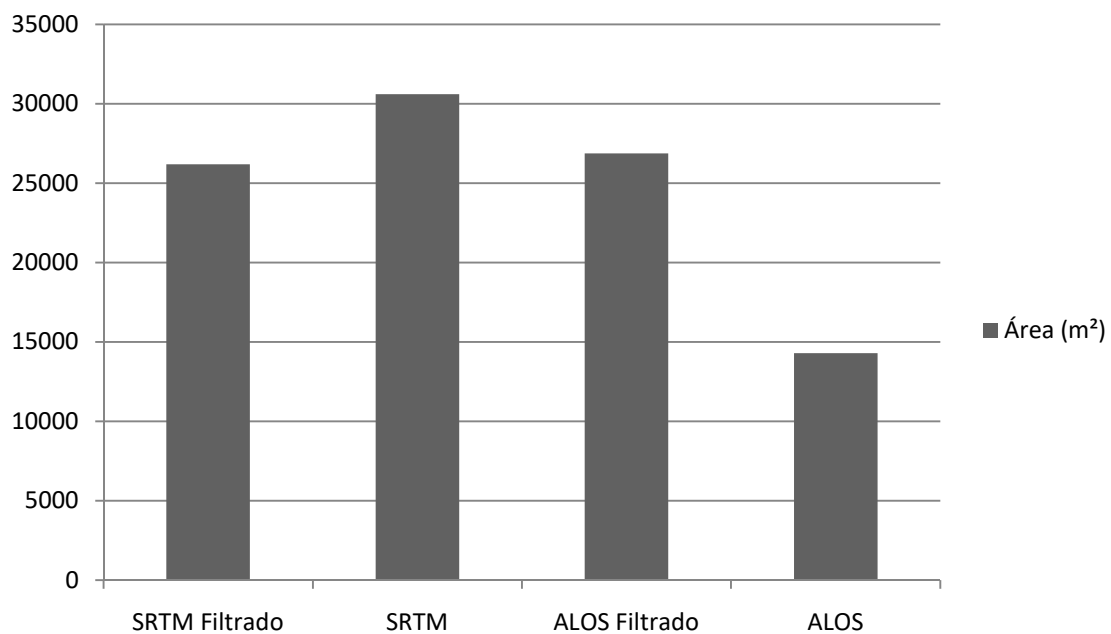
Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Em todos os cenários de comparação, a modelagem feita com as imagens de sensoriamento remoto apresentaram áreas maiores em comparação com o modelo de referência, em alguns pontos abrange uma área comum e em alguns pontos a delimitação aparece fora do polígono de referência, podendo ser justificado, de acordo com Arash (2023) pela baixa resolução que tornam os MDEs sujeitos a maiores níveis de incerteza.

Para analisar as diferenças de áreas delimitadas para inundação, foi inicialmente observada a medição das áreas em m<sup>2</sup> ocupadas pelos polígonos em cada modelagem, tendo em vista a comparação de área total de mapeamento levantada em cada metodologia.

O gráfico 1, apresenta as áreas delimitadas pelas modelagens em M<sup>2</sup>.

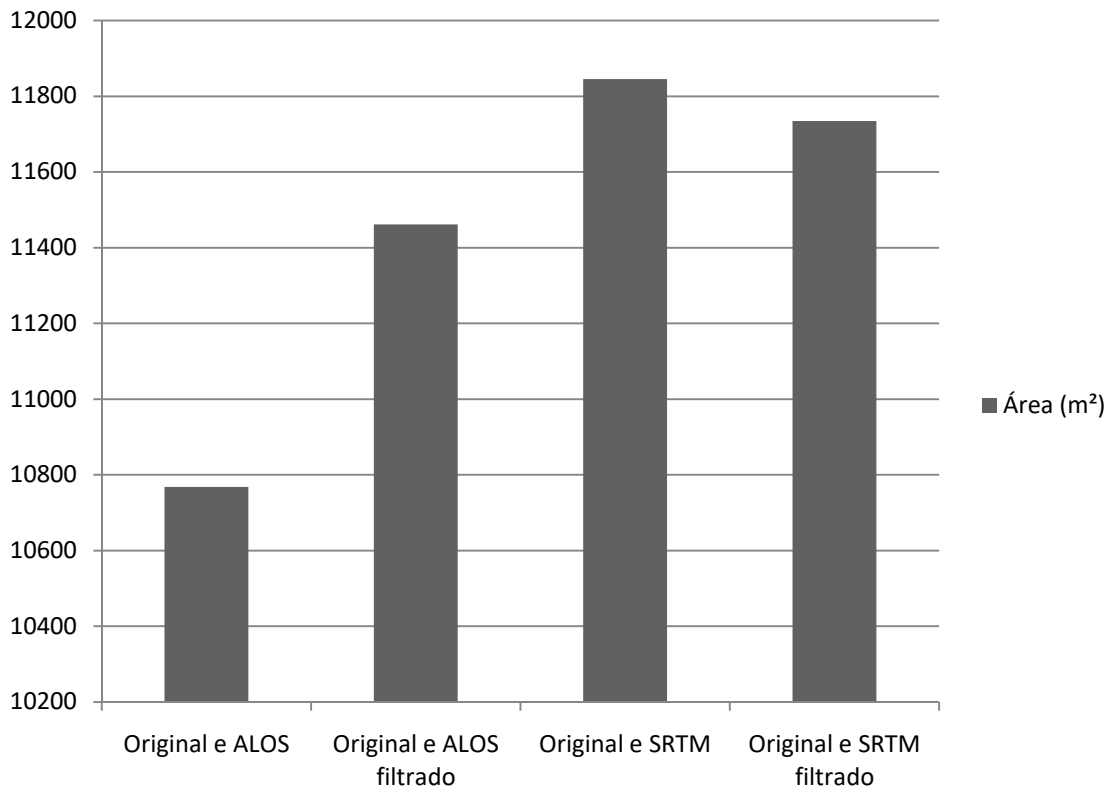
Gráfico 1 — Áreas simuladas



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

O gráfico 2, mostra a área simulada pelos modelos comparados ao perfil original de referência, avaliando sua área em sobreposição.

Gráfico 2 — Áreas em acerto

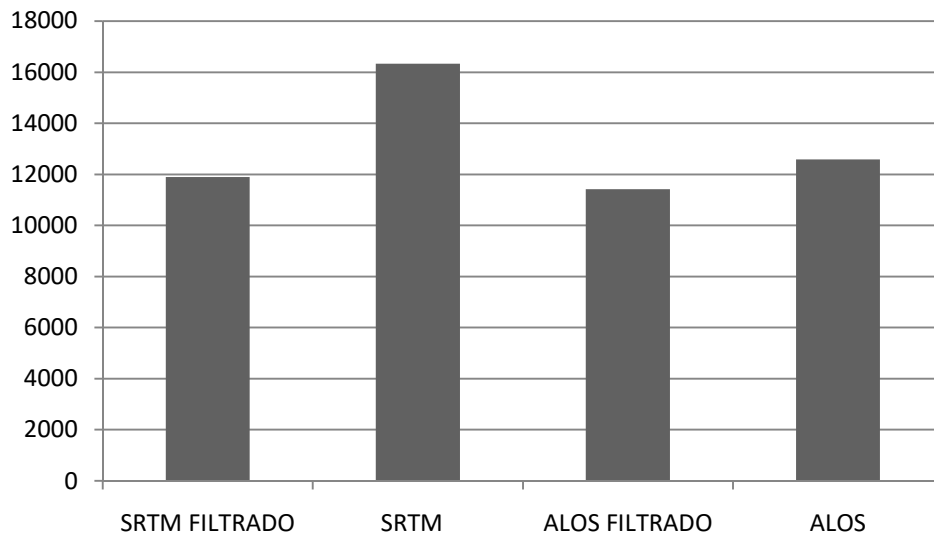


Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

As modelagens feitas mediante sensoriamento remoto apresentaram áreas maiores do que a delimitada pelo modelo de referência, e a modelagem que apresenta maior área de sobreposição entre os modelos de referência e o simulado, seria a que utilizou o MDE SRTM sem filtragem, sendo este também o modelo que apresentou maior área de inundação.

Essa análise se alinha ao estudo de Guasseli (2020), onde as imagens do Alos Palsar I apresentaram menor eficiência em comparação ao SRTM e apresenta um resultado diferente do estudo de Arash (2023), no qual o ALOS foi mais preciso após correções.

O gráfico 3, apresenta os erros de área, em M<sup>2</sup>, dos modelos filtrados e não filtrados com relação à área do polígono de referência, ou seja, áreas que foram erroneamente delimitadas.

Gráfico 3 — Áreas em erro (m<sup>2</sup>)

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Tendo em vista que o modelo obtido através do MDE SRTM, disponibilizado pela NASA, apresentou maior área de inundação e maior área comum em relação ao modelo de referência, este, também, apresenta maior quantidade de área em erro, com relação à delimitação original. E com relação às condições dos MDEs: as modelagens feitas com MDEs filtrados apresentaram menores erros de área.

A tabela 1, apresenta as distâncias, em metros, dos pontos de erro mais distantes do modelo de referência, observados nos modelos:

Tabela 1 — Maior distância de erro em cada modelagem

<b>MAIOR ERRO DISTANCIAL (m)</b>	
SRTM FILTRADO	51,143
SRTM	45,657
ALOS FILTRADO	53,094
ALOS	58,568

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Nessa análise, a modelagem que apresentou o ponto mais distante do mesmo ponto no modelo de referência, foi a imagem do ALOS palar sem filtragem, na comparação das modelagens SRTM, o modelo com filtragem foi o que apresentou maior erro distancial e na comparação entre os dois modelos filtrados, o modelo SRTM apresentou o menor erro distancial.

Esse ponto de maior distância está localizado no trecho do rio onde ocorre uma curva sinuosa, o mesmo foi relatado por Arash e Yasi (2023) que mostram o desempenho dos MDEs mais adaptável para rios retilíneos, não sendo muito competentes para demonstrar padrões sinuosos de rios de várzea e planícies e, também, por Sousa (2012), que, inicialmente, teve resultados que não reproduziam a realidade, visto que o traçado do rio era bastante sinuoso.

As tabelas 2,3,4 e 5, apresentam os resultados estatísticos, conforme as variáveis apresentadas: índice F de mapeamento de cheias, Acurácia Geral, FIT(%) e Taxa de alarme falso, para cada um dos modelos digitais de elevação, seguindo as equações já referidas e os dados apresentados nas análises dos mapas gerados.

Tabela 2 — Porcentagem de combinação (Índice F)

<b>MDE</b>	<b>%</b>
<b>ALOS</b>	35%
<b>ALOS FILTRADO</b>	40%
<b>SRTM</b>	36%
<b>SRTM FILTRADO</b>	40%

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Conforme o índice estatístico de combinação, os MDEs corrigidos via filtragem com o software CloudCompare apresentaram melhores combinações com o modelo original de referência. Esse valor se aproxima do percentual F encontrado por Momo (2016), ao analisar uma cota de inundação de 12 metros, obtendo o valor de 36,3%.

Tabela 3 — Porcentagem de combinação (Acurácia Geral)

<b>MDE</b>	<b>%</b>
<b>ALOS</b>	75%
<b>ALOS FILTRADO</b>	80%
<b>SRTM</b>	82%
<b>SRTM FILTRADO</b>	82%

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

A variável acurácia geral se comportou de maneira similar para os modelos SRTM com e sem filtro. Apresentando aumento para a modelagem ALOS filtrada.

Tabela 4 — Porcentagem de combinação (FIT [%])

<b>MDE</b>	<b>%</b>
<b>ALOS</b>	26%
<b>ALOS FILTRADO</b>	28%
<b>SRTM</b>	26%
<b>SRTM FILTRADO</b>	28%

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

O parâmetro FIT (%), assim como o índice F, apresenta melhoria dos modelos com filtragem. Esse valor, assim como referido no Índice F, se aproxima do percentual FIT encontrado por Momo (2016), ao analisar uma cota de inundação de 12 metros, obtendo o valor de 26,6%.

Tabela 5 — Porcentagem de combinação (TAF)

<b>MDE</b>	<b>%</b>
<b>ALOS</b>	44%
<b>ALOS FILTRADO</b>	46%
<b>SRTM</b>	38%
<b>SRTM FILTRADO</b>	44%

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

O índice TAF apresenta uma vantagem para área de acerto e desvantagem por erros de comissão de áreas (MOMO, 2016). Dessa forma, a melhor representação foi a modelagem SRTM sem filtragem.

É importante ressaltar as limitações no cálculo de cada um dos parâmetros: destaca-se que altos índices na variável acurácia geral não necessariamente indicam um desempenho satisfatório do modelo, pois se o modelo simular uma área de inundação muito extensa, os valores da variável de precisão serão consistentemente altos. Bons resultados no índice de TAF também não necessariamente indicam um desempenho global adequado do modelo, pois o TAF não considera os erros do modelo ao omitir áreas. Os parâmetros F e FIT refletem a habilidade do modelo em simular efetivamente a área inundada, mas não consideram as áreas não inundáveis que foram simuladas corretamente, pois ambos utilizam apenas a área de inundação para os resultados (MOMO, 2016).

Considerando que, dentre as quatro variáveis estatísticas analisadas, três delas apresentam melhores combinações para modelos com filtragem, sendo elas: o índice F, acurácia geral e FIT (%). Dessa forma, se entende que os modelos filtrados apresentam melhores combinações com o modelo de referência.

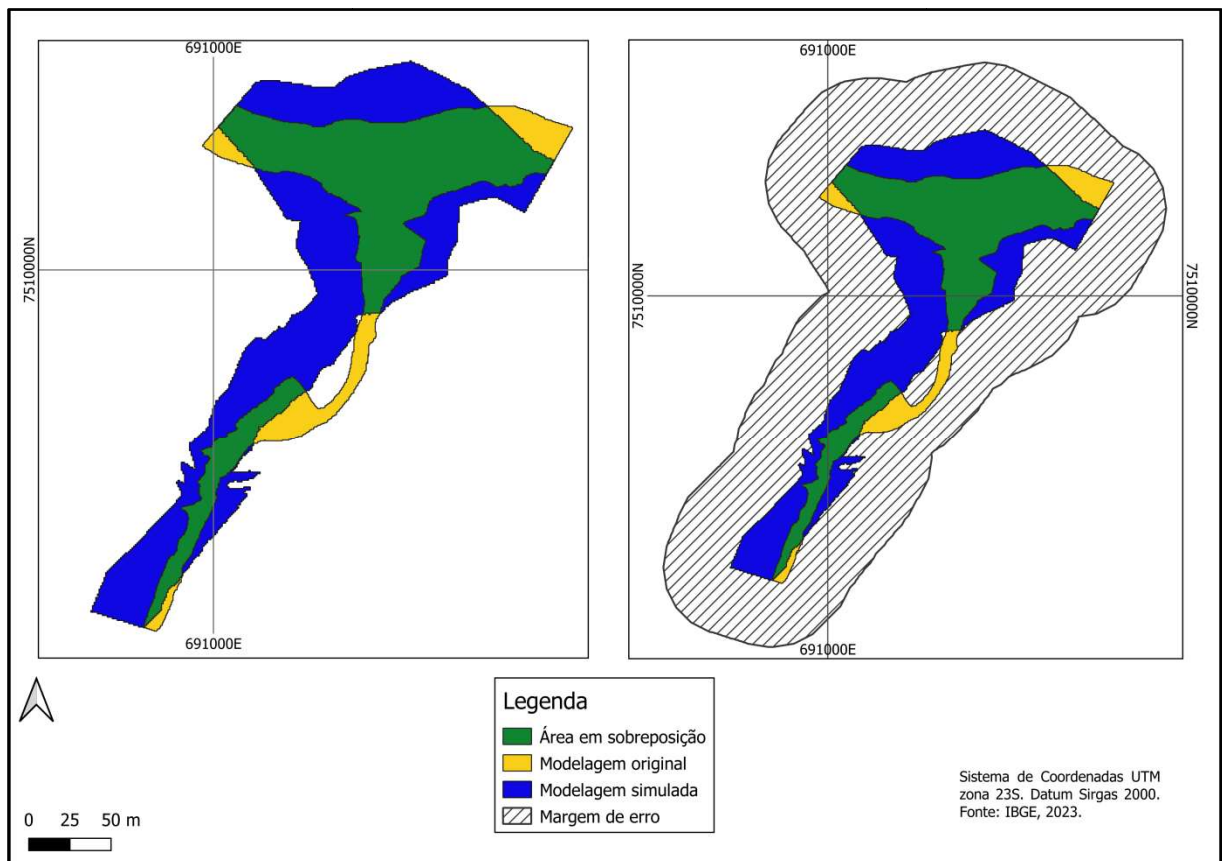
Dessa forma, uma análise possível para relacionar os resultados, seria a definição do SRTM com filtragem para a continuidade das análises, considerando que entre as modelagens filtradas, ela apresenta o menor erro distancial com 51,143 metros.

Uma forma de aplicação dos resultados seria, portanto, avaliar a utilização da modelagem SRTM filtrada, considerando uma margem de erro de 51,143 metros.

Gerando um novo mapeamento da área no software Qgis (figura 11), com a ferramenta de criação *buffer*, sendo uma ferramenta comumente utilizada para delimitação de margens, como no estudo de Mallmann (2021), foi possível estabelecer uma área com 51,143 metros ao redor do polígono que representa a modelagem com o SRTM filtrado, sendo denominada margem de erro.

Assim, contemplando a área da margem de erro, o método se torna aplicável visto que a área do polígono inicial de referência se encontraria totalmente abrangida.

Figura 11—Comparação de modelagens com margem de erro.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Analisando o mapa reformulado, que contempla a margem de erro, é possível indicar que a aplicação do método deva acompanhar uma maior atenção aos trechos sinuosos do curso d'água, pois seriam esses os trechos onde a aplicação do MDE



obtido através dos sensores, pode não se ajustar precisamente, como já referido por Arash e Yasi (2023) e Sousa (2012).

A aplicação do método em uma área não mapeada anteriormente, pode servir como instrumento para um mapeamento que dividiria os trechos abrangidos pela modelagem em áreas de maior ou menos probabilidade de inundação.

Para tanto, inicialmente, se deve atentar aos trechos curvilíneos, que muito embora na modelagem possam aparecer longe do centro do polígono de inundação, o ajuste não se dá precisamente, portanto, a localidade que poderia pertencer à zona de média probabilidade de inundação, durante um evento de cheia pode ser afetada desde o início do processo de elevação no nível da água.

Muito embora a definição de uma margem de erro a partir da maior distância de erro entre pontos afins dos modelos, possa parecer excessiva, é necessário que se compreenda que a comparação foi feita a partir de uma seção do rio da qual já havia conhecimento dos processos de inundação, devido à recorrência das cheias, o que permitiria uma adaptação de margem de erro menor que contemplasse uma menor área. Contudo, o método tem o objetivo de poder ser aplicado em localidades onde não se tem conhecimento prévio do processo de inundação, tornando a escolha do ponto de erro mais distante, uma medida de precaução para a prevenção de calamidades.

Partindo dos resultados analisados, juntamente com os valores dos parâmetros F e FIT que refletem a capacidade de simulação da área efetivamente inundada, se pode construir um mapa de áreas inundáveis, dividindo as áreas com maior e menor probabilidade de inundação, considerando os dados obtidos através do estudo, sendo eles:

Conforme os resultados do índice F de combinação, 40% da área simulada, foi inundada durante o evento, dessa forma, a área que possui uma maior probabilidade de inundação foi delimitada por uma margem ao redor do curso d'água, de forma que a sua área correspondesse a 40% da área modelada.

Para a área de média probabilidade de inundação, foram somados o restante da área simulada não incluída na mancha de maior probabilidade de inundação e metade da área da margem de erro.

O restante da área inserida na margem de erro, corresponde a uma zona de menor probabilidade de inundação.

Para a validação da construção do mapa de áreas inundáveis, como em Sauressig (2012); Trentin (2013); e Filho (2022); pode-se comparar a área considerada de alta probabilidade de inundação, com o polígono de inundação do evento analisado.

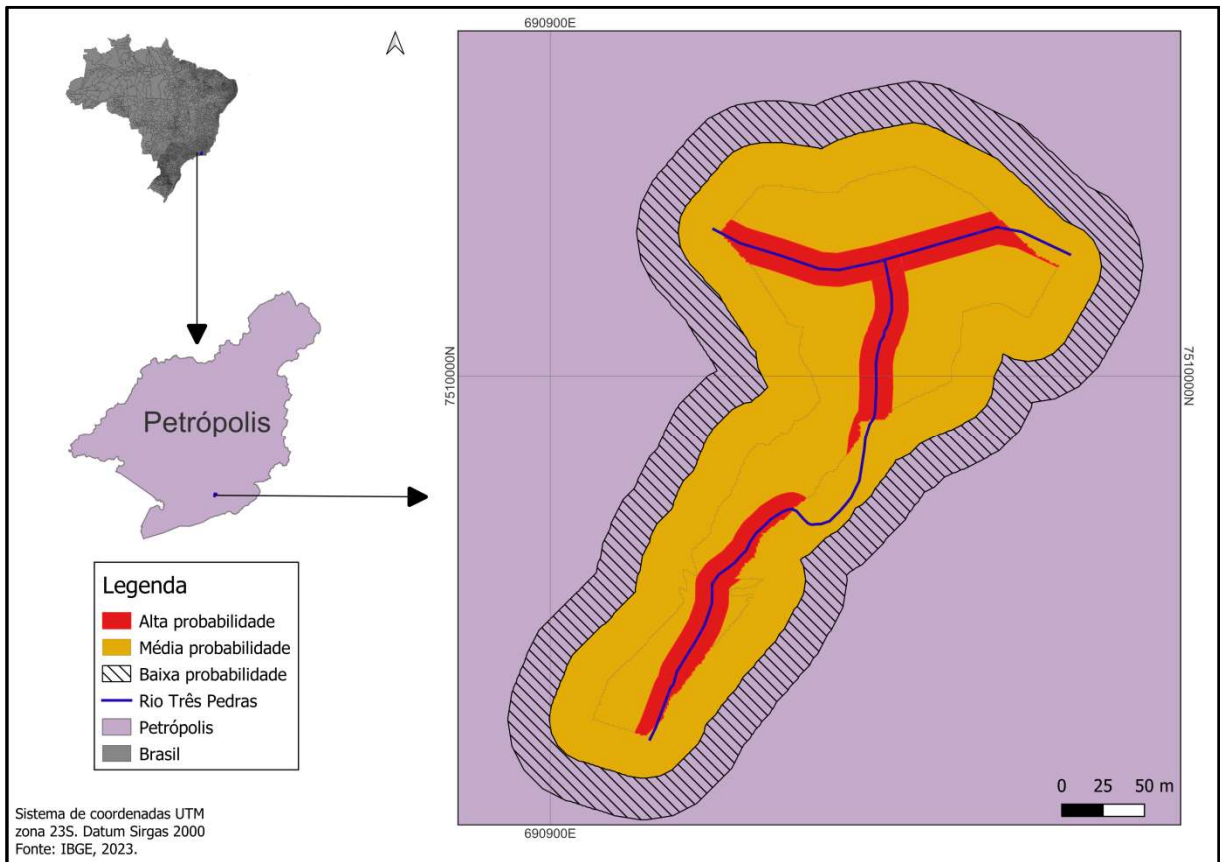
A Figura 12, foi elaborada como um exemplo de aplicação dos resultados obtidos nesse estudo para um mapeamento de áreas inundáveis, em casos onde não se possui uma modelagem de comparação com medições topográficas, de modo a utilizar apenas os resultados estatísticos e as delimitações dos modelos digitais obtidos através dos sensores.

Para tanto, é sugerida inicialmente a aplicação da metodologia utilizando do MDE SRTM com filtragem, que segundo as análises de medições de área, deve contemplar um *buffer* denominado margem de erro com 51,143 metros.

O segundo passo para a aplicação da metodologia, seria a observação do curso d'água para que se localizem os possíveis trechos onde o rio possui uma curvatura, visto que os padrões sinuosos não são delimitados precisamente, e essas áreas demandam uma atenção particular para a definição da sua probabilidade de inundação.

Para a delimitação da área com maior probabilidade de inundação, seguindo os resultados do índice F estatístico, a zona deve percorrer as margens do curso d'água de modo a ocupar 40% da área modelada. E por fim, como sugestão aplicada nesse estudo, a área considerada média probabilidade, deve contornar a zona de alta probabilidade e ainda ocupar metade do *buffer* de margem de erro, a fim de que os trechos sinuosos não delimitados corretamente pelo MDE sejam enquadrados e dessa forma, seja criada uma área mais distante, de baixa probabilidade de inundação.

Figura 12—Mapeamento das áreas inundáveis.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Comparando o mapeamento feito a partir da análise dos resultados desse estudo, com o polígono de referência, se observa que a área de inundação original foi abrangida no mapeamento, com exceção dos trechos curvilíneos do rio, que seriam zona de alta probabilidade de inundação, porém estariam delimitados dentro da zona de média probabilidade, visto que isso já havia sido apontado como uma das incertezas da aplicação da metodologia: a definição precisa do curso d'água em trechos sinuosos pelo MDE.

Os resultados desse estudo mostram que a área inundada representa 40% da área abrangida pela modelagem simulada (índice F) e que a delimitação de uma margem de erro, bem como a definição de uma zona de média probabilidade que contemple parte da margem de erro, consegue comportar as incertezas que o MDE apresenta, nesse caso, o trecho curvilíneo do rio não inserido na modelagem precisamente.

Não obstante, o estudo ressalta que deve ser feita uma análise prévia de todo o percurso do rio, antes da aplicação da metodologia, de modo a considerar possíveis falhas na delimitação do curso d'água em trechos sinuosos que devem ser observados, a fim de suas margens serem definidas como áreas de alta probabilidade de inundação, ainda que não estejam consideradas parte da modelagem simulada.

Por fim, deve-se considerar que o mapeamento a partir de sensoriamento remoto apresenta erros que devem ser avaliados em conjunto para que se obtenha um modelo confiável. Entretanto, tendo como princípio a precaução e considerando a aplicação do método em áreas onde não se tem conhecimento do histórico de inundações na localidade, se torna válida a utilização de uma modelagem que contemple uma área de inundação maior do que a utilizada como referência para esse estudo.

Em concordância com Tucci (2007), a área inserida no polígono, incluindo a margem de erro, pode ser dividida em trechos, ficando a critério do planejador a definição das medidas a serem tomadas para as diferentes zonas de abrangência do modelo, desde que observados os apontamentos desse estudo para trechos curvilíneos que podem ocorrer no curso d'água a ser avaliado.

## 8. CONCLUSÃO

Tendo em vista que está discriminada na legislação brasileira a obrigatoriedade aos entes do Estado, do controle de desastres e calamidades públicas como inundações, instrumentos que podem auxiliar a tomada de decisão e pautar os estudos para um planejamento urbano adequado para a realidade local, são extremamente importantes.

Entretanto, medidas de controle podem depender da aplicação de recursos humanos e financeiros, muitas vezes indisponíveis para alguns municípios. Dessa forma, a adoção de medidas não estruturais que contemplam as características locais e sociais da população, pode ser uma alternativa para a obtenção de informações.

A medida não estrutural apresentada nesse estudo, denominada mapeamento da área de inundação, pode ser feita a partir de imagens de satélites, as quais são fontes de dados confiáveis, disponibilizadas gratuitamente e podem ser acessadas de qualquer localidade.

Nesse estudo, foram apresentados os resultados da geração de mapas de inundação a partir de modelos digitais de elevação (ALOS e SRTM), visando comparar a geometria dos resultados com a geometria já estabelecida, baseada em topografia de campo.

Assim como o modelo de referência, as reproduções foram feitas usando o software HEC-RAS, seguindo os mesmos parâmetros para se avaliar apenas o grau de incerteza relacionado a utilização dos modelos digitais obtidos por meio de imagens de satélite, exclusivamente, como fonte de entrada.

Também foi avaliado o efeito de filtragem a partir do software CloudCompare, com o filtro CSF, para efetuar correções dos MDEs, gerando, portanto, dois novos modelos de entrada para utilização do HEC-RAS na geração do mapeamento de inundação.

Dessa forma, algumas conclusões puderam ser obtidas e discutidas:

O SRTM se mostrou mais eficiente do que ALOS na representação da geometria do rio para modelagem de inundação, conforme a conclusão de Guasseli (2020).

Todavia, o modelo obtido através do SRTM, ainda apresentou uma precisão

razoável ou baixa. Que de acordo com Arash e Yasi (2023), ocorre por ser originalmente mais adaptável para rios retilíneos, não sendo muito competentes para demonstrar padrões sinuosos de rios de várzea e planícies.

A filtragem CSF possibilitou melhor visualização dos resultados obtidos com a modelagem, de modo a delimitar melhor a planície de inundação;

A filtragem, em ambos os MDEs (ALOS e SRTM), possibilitou melhoria do desempenho da modelagem segundo os parâmetros do índice F, Acurácia Geral e FIT(%);

A análise do ponto de erro mais distante do polígono de referência possibilitou a definição do limite da margem de erro, tendo como princípio a precaução, mostrando uma área de contorno máximo onde ainda se deve ter atenção durante a elaboração do planejamento urbano.

A área total da modelagem, associada a margem de erro, pode ser usada para a delimitação de diferentes zonas de probabilidade de inundação, onde as zonas mais próximas das margens do curso d'água seriam as áreas de maior probabilidade, seguidas de uma área intermediária de média probabilidade e por fim baixa probabilidade nas áreas mais distantes. Todavia, em trechos onde o curso d'água possui curvas, deve-se aplicar uma maior atenção na delimitação, visto que o modelo pode não se aplicar precisamente em regiões sinuosas.

Por fim, os objetivos propostos pelo estudo foram concluídos, de modo a apresentar as observações necessárias para a aplicação do método em localidades onde não se tem uma delimitação ou mapeamento das áreas de inundação, para auxiliar as tomadas de decisões e servir como uma forma de embasamento acessível para o monitoramento das áreas de inundação, bem como descrevendo as limitações da metodologia para os resultados poderem ser aplicados em outras análises e possivelmente melhorados.

## 9. REFERÊNCIAS

- PLATONOW, Vladimir. **Petrópolis registrou 250 deslizamentos em 24 horas por causa da chuva**. Agência Brasil, 21 mar. 2022. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-03/petropolis-registrou-250-deslizamentos-em-24-horas-por-causa-da-chuva>. Acesso em: 25 jun. 2023.
- BARBON, Júlia. **Chuvas fortes matam ao menos cinco pessoas em Petrópolis neste domingo**. Folha de S. Paulo, 20 mar. 2022. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2022/03/chuvas-fortes-assustam-petropolis-e-sirenes-de-emergencia-sao-acionadas.shtml>. Acesso em: 25 jun. 2023.
- ALIPOUR, Atieh; JAFARZADEGAN, Keighobad; MORADKHANI, Hamid. **Global sensitivity analysis in hydrodynamic modeling and flood inundation mapping**. Environmental Modelling & Software, v. 152, p. 105398, 2022.
- ALVES, Fabio Corrêa. **Análise Morfoestrutural das bacias dos rios Raraíba e Mamanguape (PB), com base em MDE-SRTM e Imagem PALSAR/ALOS-1**. 2015. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.
- ALVIM, Renata Barbosa. **Dinâmica do Nitrogênio e Fósforo em Águas Fluviais de Uma Bacia Hidrográfica com Diferentes Usos do Solo no Sudeste do Brasil**. Tese (Doutorado em geociências). Universidade Federal Fluminense: Rio de Janeiro, Brazil, 2016.
- ANDRADE, Samuel Lacerda; DE OLIVEIRA FERREIRA, Vanderlei; SILVA, Mariana Mendes. **Elaboração de um mapa de risco de inundação da bacia hidrográfica do córrego São Pedro, área urbana de Uberlândia-MG**. Caderno de Geografia, v. 24, n. 41, p. 1-16, 2014.
- ARASH, Amir Mohammad; YASI, Mehdi. The assessment for selection and correction of RS-based DEMs and 1D and 2D HEC-RAS models for flood mapping in different river types. **Journal of Flood Risk Management**, v. 16, n. 1, p. e12871, 2023.
- ATHIRA, S.; KATPATAL, Yashwant B.; LONDHE, Digambar S. **Flood Modelling and Inundation Mapping of Meenachil River Using HEC-RAS and HEC-HMS Software**. In: International Conference on Climate Change and Ocean Renewable Energy. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022. p. 113-130.
- BARROS, R. M.; MENDIONDO, E. M.; WENDLAND, E. **Cálculo de áreas inundáveis devido a enchentes para o plano diretor de drenagem urbana de São Carlos (PDDUSC) na bacia escola do córrego do Gregório**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 12, p. 5-17, 2007.
- BORGES, F.O.; FERREIRA, V. O.. **PLANÍCIES DE INUNDAÇÃO E ÁREAS INUNDÁVEIS: análise comparativa dos conceitos mediante aplicaçãonas bacias**

hidrográficas do ribeirão Bom Jardim e rio das Pedras, Triângulo Mineiro. Revista Cerrados (Unimontes), vol. 17, núm. 1, 2019. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=576961001007>. Acesso em: 14/04/2023.

BORGES, TauaniAndrieli Souza. **Determinação do índice de susceptibilidade na bacia do Rio Gravataí-Rio Grande do Sul**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Maria. 2023.

BRASIL. Lei Nº 12.608, de 10 de abril de 2012. **Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC**; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nºs 12.340, de 1º de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Brasília, DF: 2012.

BRUNNER, Gary W. **Hec-ras (sistema de análise de rios)**. In: Congresso Norte Americano de Água e Meio Ambiente & Água Destrutiva. ASCE, 2002. p. 3782-3787.

CAMPANA, Alice Seben. **Análise de áreas suscetíveis à inundação na Villa O'Higgins, Patagônia Central, Chile, utilizando o sensoriamento remoto e o processo analítico hierárquico**. Dissertação (Pós-Graduação em Geografia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2023.

CASTRO, T.A.D. **Aplicabilidade de filtro digital para separação e escoamento em bacias hidrográficas sob o domínio de aquíferos fraturados**. Dissertação (Pós-Graduação em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Pelotas. Rio Grande do Sul, 2021. 107 p.

CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E.; ROCHA, M.F.; CARVALHO JÚNIOR, W.; SOUZA NETO, N.C. **Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, 2010. p.218-226.

CORRÊA, Deborah Dotta et al. **Mapeamento de risco de inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí utilizando descritor de terreno e aspectos socioeconômicos**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina. 2022.

COSTA, Amanda Cristine Santos da. **Intemperismo químico e influência antropogênica em uma bacia tropical granito-gnáissica situada na Região Serrana – RJ. Niterói: [s. n.], 2017.**

DA COSTA, Andresa Marques et al. **Análise das áreas com risco de inundações urbanas e escorregamentos de terra em três bairros do município de Jundiá/SP**. South American Sciences, v. 3, n. 1, p. e22158-e22158, 2022.

DA SILVA, Carlos Eduardo Menezes et al. **Valoração de serviços ecossistêmicos culturais como estratégia para o planejamento urbano**. Revibec: revista iberoamericana de economía ecológica, v. 35, n. 1, p. 19-35, 2022.



ETCHELAR, C. B.; SIRANGELO, F. R.; BELLOLI, T. F.. **O impacto das atividades antrópicas nas áreas úmidas na planície de inundação do rio Gravataí-RS**. Revista Geonorte, v. 5, n. 20, 2014. p.385-390.

ETCHELAR, C. B.; FERRAZ, R.S.; GUASSELLI, L.A.. Metodologias para monitoramento dos processos erosivos no Banhado Grande, bacia Hidrográfica do Rio Gravataí. In: **Anais**. Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis (5.: 2019: Porto Alegre), volume 01. Porto Alegre: GFM, 2019.

FARIAS, Ariadne; MENDONÇA, Francisco. **Riscos socioambientais de inundação urbana sob a perspectiva do Sistema Ambiental Urbano**. Sociedade & Natureza, v. 34, 2022.

FELICIANO, Fernando César Soares. **Modelagem hidrodinâmica e mapeamento de áreas de inundação urbana do município de Rio Piracicaba/MG**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2022.

FERNANDES, Bruno Henrique Rovaron et al. **Levantamento topográfico, estudo de microbacia hidrográfica e análises de solo para solucionar um problema de inundação na Avenida Brasília em São João da Boa Vista-SP: um estudo de caso**. Projetos Integrados, 2022.

FERREIRA, Maurício Tolstói dos Santos. **Mapeamento e avaliação do grau de risco de inundação em áreas urbanas**. Dissertação (Pós-Graduação em Ciências Climáticas). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Brasil. 2019

FIGUEIREDO, D.. **Conceitos básicos de sensoriamento remoto**. São Paulo: Edição do autor, 2005. 30 p. Disponível em: [https://www.clickgeo.com.br/wp-content/uploads/2013/04/conceitos\\_sm.pdf](https://www.clickgeo.com.br/wp-content/uploads/2013/04/conceitos_sm.pdf). Acesso em: 14/04/2023.

FILHO, David Figueiredo Ferreira; DE SOUSA FILHO, Hudson Nascimento; SOARES, Daniel Araújo Sombra. **IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS COM RISCO DE INUNDAÇÕES EM ORIXIMINÁ (PA): CONTRIBUIÇÕES À ELABORAÇÃO DO ZONEAMENTO AMBIENTAL MUNICIPAL**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Pará. 2022

FONSECA, Alan Gonçalves; DE FÁTIMA TOLEDO, Josilene; DE OLIVEIRA SANCHES, Fabio. A IMPORTÂNCIA DA GESTÃO DA DRENAGEM PLUVIAL URBANA NA PREVENÇÃO DE INUNDAÇÕES E ALAGAMENTOS: ESTUDO DECASO NO MUNICÍPIO DE MURIAÉ-MG. In: **Anais**. IV Simpósio de recursos hídricos da bacia do rio Paraíba do sul. Rio de Janeiro. 2023.

FU, Guangtao et al. **Are sponge cities the solution to China's growing urban flooding problems?**. WileyInterdisciplinary Reviews: Water, v. 10, n. 1, p. e1613, 2023.

GOMES, Dênis José Cardoso; BELTRÃO, Norma Ely Santos; DIAS, Yuri Alefh Saraiva. CHEIAS NO ARQUIPÉLAGO DO MARAJÓ: ANÁLISE DE SAZONALIDADE EM ANOS EXTREMOS ATRAVÉS DE PROCESSAMENTO DE DADOS SAR

NOGOOGLE EARTH ENGINE. In: **Anais**. XX Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto. Santa Catarina. 2023.

GOUVEA, L.H.A. **GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS COM O AUXÍLIO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS OPEN SOURCE**. Relatório de estágio (Curso de Engenharia Florestal), Universidade Federal do Pampa, 2018.

GUASSELLI, L.A.; SIMIONI, J.P.D.; LAURENT, F. **Mapeamento e classificação de áreas úmidas usando TopographicWetness Index (TWI) a partir de modelos digitais de elevação, na bacia hidrográfica do Rio Gravataí**: Rio Grande do Sul, Brasil. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 21, n. 3, jul./set., 2020. p. 639-659.

GUTA, Hélder. APLICAÇÃO DE HEC-HMS PARA MODELAGEM DE PRECIPITAÇÃO-ESCOAMENTO EM MOÇAMBIQUE E FRANÇA. In: **Anais**. XVI Simpósio de recursos hídricos no nordeste. 2022

HICKS, F. E.; PEACOCK, T. **Suitability of HEC-RAS for flood forecasting**. Canadian water resources journal, v. 30, n. 2, p. 159-174, 2005.

KARASAKA, L , KELEŞ, S . (2020). **CSF (Cloth simulation filtering) Algoritmasının Zemin Noktalarını Filtrelemedeki Performans Analizi**. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi , 20 (2) , 267-275

LARENTIS, Dante Gama. **Procedimentos e critérios para zoneamento de planícies de inundação em áreas urbanas**. Revista de Gestão de Água da América Latina, v. 17, n. 2020, 2020.

LEE, J.; JEONG, J.; KIM, H.. **Segmentation of Seabed Points from Airborne Bathymetric LiDAR Point Clouds Using Cloth Simulation Filtering Algorithm**. Journal of the Korean Surveying Society, v. 38, n.1, 2020. p.1-9.

LIMA, D.M. **Abordagens distribuídas para simulação do escoamento superficial baseadas no modelo digital de elevação**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, 2021. 121p.

LIU, William Tse Horng. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

LOU, Rodrigo Furtado. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do Rio Piabanha/RJ**. 2010. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MALLMANN, ADRIANE AVELHANEDA; FILHO, JOSÉ AMÉRICO DE MELLO. IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE RISCO DE INUNDAÇÃO NA ÁREA URBANA DE PORTO XAVIER In: **Anais**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC. Goiânia/GO. 2021

MARTINS, Ilziane Carmem. **Análise comparativa de metodologias de mapeamento de uso conflitante da terra**: estudo de caso em sub-bacias do rio

Araçuaí. Dissertação (Pós-Graduação em Ciência Florestal). Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. 2022.

MARTINS, Vinícius Emmel; SILVA, Dieison Morozoli Da; GASS, Sidnei Luís Bohn. Correção Atmosférica De Imagens De Satélite Para Fins De Mapeamento Temporal De Uso E Cobertura Do Solo. **In:**, 2017, Ijuí. XXV Seminário de Iniciação Científica. Ijuí: Unijuí, 2017.

MARTÍNEZ BARBÁCHANO, Rubén. **Estimativa da área afetada por inundações através de polarimetria com imagens Sentinel 1A Synthetic Aperture Radar (SAR) na bacia do rio Frío (Costa Rica)**. Revista Geográfica de América Central, n. 70, p. 273-296, 2023.

MELO, Danilo Heitor Caires Tinoco Bisneto et al. **Evolução da observação da terra por Sensoriamento Remoto**. Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto, v. 024, n. 2, p. 2–24, 2021.

MENDES, Thiago Augusto et al. **Uso do modelo HEC-RAS com base em informações de LiDAR para avaliação de inundações urbanas**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 27, p. 141-157, 2022.

MENEGASSO, J. D. **Mapeamento do risco de inundação na bacia hidrográfica do Rio Belo, Orleans, SC**. Orientador: Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig. 2019. 148p. Dissertação (Mestre em Ciências Ambientais.). Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma, 2019.

MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, T. de. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

MIGNOT, Emmanuel; DEWALS, Benjamin. **Hydraulic modelling of inland urban flooding: recent advances**. Journal of hydrology, p. 127763, 2022.

MILANESI, Jonas; DE QUADROS, Everton Luís Luz; LAHM, Regis Alexandre. Utilização do modelo HAND no reconhecimento dos terrenos sujeitos a inundação-Porto Alegre/RS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 4, p. 675-686, 2017.

MINELLA, J.P.G., MERTEN, G.H., **Índices topográficos aplica-dos à modelagem agrícola e ambiental**. Ciência Rural, Santa Maria, v.42, n.9, p.1575-1582, set. 2012.

MIOLA, Alessandro Carvalho et al. **Planejamento para comunidades rurais em situações de enchentes**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria.

MIRANDA, G. H. B.; MEDEIROS, N. G.; SANTOS, A. P.; SANTOS, G. R. **Análise de Qualidade de Amostragem e Interpolação na Geração de MDE**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 70, n. 1, jan./mar., 2018.p. 226-257.

MISHRA, Siba Prasad; SETHI, Kumar Chandra; SIDDIQUE, Mohammed. Emerging threats during anthropocene as urban Flooding of Bhubaneswar city, india. **Water And Energy International**, v. 63, n. 1, p. 46-58, 2020.

MOMO, Marcos Rodrigo et al. **Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial**. RBRH, v. 21, p. 200-208, 2016.

NAMARA, Wana Geyisa; DAMISSE, Tamene Adugna; TUFA, Fayera Gudu. Application of HEC-RAS and HEC-GeoRAS model for flood inundation mapping, the case of Awash bello flood plain, upper Awash River Basin, oromiya regional state, Ethiopia. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 8, n. 2, p. 1449-1460, 2022.

NAVARRO, Isadora Fonseca et al. **Aplicação do Índice de Concentração de Rugosidade (ICR) para Avaliação da Mancha de Inundação da Barragem Vargem Grande em Nova Lima (MG)**. Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto, v. 4, n. 1, 2023.

NOBRE, Antonio Donato et al. Height Above the Nearest Drainage—a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology**, v. 404, n. 1-2, p. 13-29, 2011.

NOVO, E. M. L. M.. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 4ª ed. São Paulo: Edgard Blucher. 2010

DE OLIVEIRA, Alarcon Matos et al. Classificação não supervisionada aplicada ao MDE para identificação de Lagoas. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 3, n. 4, p. 3696-3714, 2020.

PADAWANGI, Rita; DOUGLASS, Mike. **Water, water everywhere: Toward participatory solutions to chronic urban flooding in Jakarta**. Pacific Affairs, v. 88, n. 3, p. 517-550, 2015.

PINHEIRO, H.S.K.; CHAGAS, C.S.; CARVALHO-JÚNIOR, W.; ANJOS, L.H.C.. **Modelos de elevação para obtenção de atributos topográficos utilizados em mapeamento digital de solos**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.47, 2012.p.1384-1394.

PRADHAN, Devashish; SAHU, Ramgopal T.; VERMA, Mani Kant. **Flood inundation mapping using GIS and Hydraulic model (HEC-RAS): A case study of the BurhiGandak river, Bihar, India**. In: Soft Computing: Theories and Applications: Proceedings of SoCTA 2021. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p. 135-145.

QUEIROGA, Amanda Alves et al. Mapeamento de áreas suscetíveis à inundação aplicando diferentes modelos digitais de elevação no modelo Height Above the Nearest Drainage (HAND). **Revista do Departamento de Geografia**, v. 43, p. e191008-e191008, 2023.

ROBERTO, Arcádio Joaquim. **Extração de Informação Geográfica a partir de Fotografias Aéreas obtidas com VANTs para apoio a um SIG Municipal**. Faculdade de Ciências da Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Porto. 2013.

ROSENQVIST, Ake et al. **ALOS PALSAR**: A pathfinder mission for global-scale monitoring of the environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 45, n. 11, p. 3307-3316, 2007.

SANTOS, Lucas de Siqueira. **Mapeamento da suscetibilidade a inundações no Município de Jaboatão dos Guararapes (PE) a partir do modelo HAND e MDT de alta resolução espacial**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso.

SANTOS, J. S. A.; FRAGA, A. A.; LUGÃO, L. R.; ALVAREZ, C. E. de. Eficiência energética e planejamento urbano frente às mudanças climáticas: uma revisão sistemática. In: 2º CONGRESSO INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE URBANA, 2. 2022, Vitória. **Anais** [...]. Vitória: UFES, 2022. p. 673-682. ISBN: 978-989-53626-0-8

SANTOS, Rafaela Pastoura; CORTESE, Tatiana Tucunduva P. **Planejamento Urbano e Desastres**: Uma Revisão Sistemática de Literatura PRISMA. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades* ISSN eletrônico 2318-8472, volume 10, número 78, 2022

SANTOS, Suzan Juliana da Costa. **Fluxos de carbono em rios tropicais montanhosos**: métodos de quantificação e estudo de caso da bacia do rio Piabanha, RJ, Brasil. Tese (PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS – GEOQUÍMICA). Universidade Federal Fluminense. 2022.

SAUERESSIG, S.R. **Zoneamento das áreas de risco a inundação da área urbana de Itaquí-RS**. Dissertação (Pós-Graduação em Geografia e Geociências), Universidade Federal de Santa Maria, 2012. 100p.

Silva, D.M., 2023. **Arenização e Uso e Cobertura da Terra na Bacia Hidrográfica do Arroio Taquari-Miracatu**: Uma Análise Sob a Ótica do Sensoriamento Remoto. Dissertação (Mestrado em Geografia). Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SILVA, Monara Nogueira. **Análise da suscetibilidade à inundação na área urbana de Patos de Minas-MG**. Trabalho de Conclusão de Curso II, Universidade Federal de Uberlândia. 2023.

SOUSA, L. F. N. M. **Metodologia para o mapeamento de cheias em zonas de risco. Aplicação a um trecho de um rio do norte de Portugal**. Dissertação de Mestrado de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2012.

SPÖRL, Christiane; ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. **Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos**. *GEOUSP-Espaço e Tempo*, v. 15, p. 39-49, 2004.

TRENTIN, Romario; DE SOUZA ROBAINA, Luís Eduardo; SILVEIRA, Vanessa Salvade. **Zoneamento do risco de inundação do rio Vacacaí no município de São Gabriel, RS**. *Geo Uerj*, v. 1, n. 24, p. 161-180, 2013.

TUCCI, Carlos EM. **Gestão da drenagem urbana**. 2012. Disponível em [https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/38004/LCBRSR274\\_pt.pdf](https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/38004/LCBRSR274_pt.pdf). Acesso em 29/05/2023.

TUCCI, Carlos EM et al. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH/Rhama, v. 11, 2007. Disponível em: [https://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/importacao/institucional/grupos-de-trabalho/encerrados/residuos/documentos-diversos/outras\\_documentos\\_tecnicos/curso-gestao-do-territorio-e-manejo-integrado-das-aguas-urbanas/drenagem1.PDF](https://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/importacao/institucional/grupos-de-trabalho/encerrados/residuos/documentos-diversos/outras_documentos_tecnicos/curso-gestao-do-territorio-e-manejo-integrado-das-aguas-urbanas/drenagem1.PDF). Acesso em 25/04/2023

VALERIANO, M.M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos, SP: INPE: , 2004. 72 p. (INPE-10550-RPQ/756). Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/06.30.10.57/doc/MODELO%20DIGITAL%20DE%20ELEVA%20COM%20DADOS%20SRTM%20DISPONIVEIS%20PARA%20AMERICA%20DO%20SUL.pdf>. Acesso em 02/06/2023.

VICENTE, Bruna Moraes et al. **Comparação entre estimativas de mancha de inundação devido a ruptura hipotética de barragem utilizando diferentes bases topográficas**. Trabalho Conclusão do Curso, Universidade Federal de Santa Catarina. 2022.

VILLALTA, Vanessa. **Comparativo de precisão georreferenciada entre GPS Geodesico, Google Earth Pro Software QGIS**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade de Taubaté. 2020.

XAVIER, Carolline dos Santos et al. **A Relação dos Eventos de Inundação com as Características Físicas da Bacia Hidrográfica: o Caso da Bacia do Rio Acari, Rio de Janeiro-RJ**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso.

ZHANG, Wuming et al. **An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation**. Remote sensing, v. 8, n. 6, p. 501, 2016.