



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**  
**COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**SHAYELLI LAIANY MARECO ABRANTES**

**ANÁLISE DO RISCO DE DESASTRES POR INUNDAÇÃO UTILIZANDO O  
MODELO *HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE (HAND)* NA CIDADE DE  
SÃO JOÃO DO RIO DO PEIXE, PARAÍBA, BRASIL**

**João Pessoa - PB**

**Abril - 2020**

SHAYELLI LAIANY MARECO ABRANTES

**ANÁLISE DO RISCO DE DESASTRES POR INUNDAÇÃO UTILIZANDO O  
MODELO *HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE (HAND)* NA CIDADE DE  
SÃO JOÃO DO RIO DO PEIXE, PARAÍBA, BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba, como um dos requisitos obrigatórios para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Hamilcar José Almeida Filgueira

**João Pessoa - PB**

**Abril - 2020**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

Al61a Abrantes, Shayelli Laiany Mareco.

ANÁLISE DO RISCO DE DESASTRES POR INUNDAÇÃO UTILIZANDO  
O MODELO HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE (HAND) NA  
CIDADE DE SÃO JOÃO DO RIO DO PEIXE, PARAÍBA, BRASIL /  
Shayelli Laiany Mareco Abrantes. - João Pessoa, 2020.  
61f.

Orientação: Hamilcar José Almeida Filgueira.  
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. inundações urbanas;riscos de desastres;modelo HAND.  
I. Filgueira, Hamilcar José Almeida. II. Título.

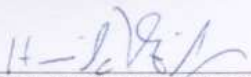
UFPB/BC

FOLHA DE APROVAÇÃO

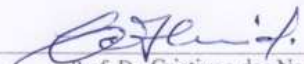
SHAYELLI LAIANY MARECO ABRANTES

ANÁLISE DO RISCO DE DESASTRES POR INUNDAÇÃO UTILIZANDO O  
MODELO *HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE (HAND)* NA CIDADE DE  
SÃO JOÃO DO RIO DO PEIXE, PARAÍBA, BRASIL

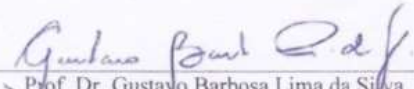
Trabalho de Conclusão de Curso em 01/04/2020 perante a seguinte Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Hamilcar José Almeida Filgueira  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

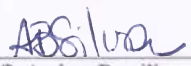
Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Gustavo Barbosa Lima da Silva  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Andrea Brasiliano Silva  
Matricula Siape: 1549557  
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

## DEDICATÓRIA

Dedico a conclusão dessa etapa da minha vida aos meus pais, que são os principais motivos para a concretização desse sonho, e foram a minha fonte de energia durante toda minha caminhada até aqui.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Lucinéria Mareco e Francisco Abrantes, e ao meu irmão, Charles Abrantes, que sempre acreditaram no meu potencial e sempre me incentivaram a me tornar uma pessoa melhor e a correr atrás dos meus sonhos. Essa vitória não teria sentido se não fosse por vocês e pra vocês!

A minha família, que sempre esteve presente comemorando cada vitória alcançada, em especial aos meus padrinhos, Luzia Mareco e Raimundo Sá, que me deram todo o suporte durante esses cinco anos de graduação; a minha tia Vilani Abrantes, que mesmo distante sempre esteve presente me encorajando e sendo uma fonte de inspiração para que eu não desistisse; e aos meus primos, Vitória Maria e Vinicius Abrantes, que são como irmãos e sempre estiveram comigo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Hamilcar José Almeida Filgueira, por todo o conhecimento transmitido, pela paciência e pelo voto de confiança nessa etapa final; e por me apresentar a área social da engenharia, que tanto me encantou e trouxe mais sentido a minha jornada.

Aos meus amigos Vitória Maria Regis, Beatriz Valadares, Larissa Alves, João Victor, Elyson Duarte, Matheus Ferreira, Kananda Bezerra e Felipe Danzmann, que estiveram comigo durante esses últimos cinco anos, vivendo bons e más momentos.

A Diego Padilha, Filipe Carvalho, Chiara Teodoro, Bruna Helena, Elisa Andrade e ao “squad”, por todo o companheirismo nos últimos anos e por me ajudarem a fazer essa pesquisa acontecer, escutando todos os meus lamentos nessa etapa final e me dando forças para que eu não desistisse quando pensei não ser capaz.

Aos professores, Dr. Cristiano das Neves Almeida e Dr. Gustavo Barbosa Lima Silva, por contribuírem com esse trabalho ao aceitarem participar da banca examinadora.

À Universidade Federal da Paraíba, por todas as experiências profissionais vividas como pesquisadora, monitora e empreendedora.

A todas as mulheres que vieram antes de mim, e venceram muitas batalhas para que hoje eu pudesse estar aqui concluindo minha graduação em engenharia.

***I'm a survivor!***

## RESUMO

O risco a desastres causados por fenômenos naturais é algo comum nas zonas urbanas mundiais, muitas vezes ligado ao crescimento desordenado das cidades e à ocupação de áreas impróprias e suscetíveis a risco. Os desastres ligados a eventos de inundações é algo recorrente no país, e diferentemente do que se pensa, também são recorrentes na região semiárida brasileira, mesmo que em menores proporções quando comparados com os causados pelas secas. Este trabalho teve como intuito avaliar a suscetibilidade ao risco por inundações da cidade de São João do Rio do Peixe, localizada no semiárido paraibano. Para isso, foi utilizado como ferramenta de análise o modelo *HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE* (HAND). O modelo HAND, desenvolvido por pesquisadores do INPE, é uma ferramenta bastante acessível para o mapeamento de áreas de risco a desastres por inundações devido a facilidade de obtenção dos dados de entrada para a área que se busca analisar. Neste trabalho, foram utilizados dois modelos digitais de elevação com resoluções diferentes afim de avaliar qual modelo traria uma melhor representação da realidade da cidade estudada, onde os resultados obtidos foram comparados com dados históricos obtidos a partir de conversas informais com residentes da região e por bibliografias sobre a cidade. Com isso, foi possível criar uma escala de grau de risco a desastres por inundações para a cidade de São João do Rio do Peixe e avaliar quais áreas da cidade estavam mais suscetíveis a esse tipo de risco.

**Palavras-chave:** inundações urbanas; riscos de desastres; modelo HAND.

## **ABSTRACT**

The risk caused by natural disasters is common in urban areas worldwide, often triggered by disorderly growth in cities and the occupation of prohibited and susceptible areas at risk. Disasters linked to flood events are recurrent in the country, and contrary to popular belief, they are also recurrent in the Brazilian semiarid region, even if in the smallest proportions when compared to those used by droughts. This study aimed to assess the susceptibility to risk from floods in the city of São João do Rio do Peixe, located in the semi-arid region of Paraíba. For this, it was used as an analysis tool or model HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE (HAND). The HAND model, developed by INPE researchers, is a very accessible tool for mapping areas at risk of flooding disasters due to the ease of using the input data for an area that seeks to research. In this work, two digital augmentation models were used, with differences in assessment, which is the model for assessing the reality of the city studied, where the results were compared with historical data, based on informal conversations with residents of the region and bibliographies about the city. . With that, it was possible to create a scale of degree of risk for flooding disasters in the city of São João do Rio do Peixe and to assess which areas of the city were most susceptible to this type of risk.

**Keywords:** urban flood; disasters risk; HAND model.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Percentual de ocorrências de inundações em cada região do país .....	19
Figura 2 - Localização do município de São João Do Rio Do Peixe .....	26
Figura 3 - Precipitação acumulada anual do município de São João Do Rio Do Peixe - PB nos últimos 30 anos .....	27
Figura 4 - Localização da rede de drenagem do Rio do Peixe próxima à cidade de São João Do Rio Do Peixe .....	28
Figura 5 – Determinação da direção de fluxo do canal de drenagem pelo método D8 .....	30
Figura 6 – Procedimento de correção de incoerências do MDE e determinação da LDD .....	30
Figura 7 – Determinação da matriz de rede de drenagem a partir da definição do valor do limiar de drenagem.....	31
Figura 8 - Determinação da matriz HAND .....	32
Figura 9 – Bairro da região sul da cidade de São João Do Rio Do Peixe durante a inundação de 2009.....	36
Figura 10 – Localização da cidade de São João do Rio do Peixe na “sub-bacia hidrográfica” (primeiro modelo) obtida pelo MDE SRTM.....	37
Figura 11 – Localização da cidade de São João do Rio do Peixe na “sub-bacia hidrográfica” (primeiro modelo) obtida pelo MDE ALOS PALSAR .....	38
Figura 12 – Localização do exutório adotado.....	39
Figura 13 – “Sub-bacias” (segundo modelo) .....	39
Figura 14 – Redes de drenagem obtidas a partir dos limiares de drenagem adotados (modelo um) .....	40
Figura 15 – Redes de drenagem obtidas a partir dos limiares de drenagem adotados (modelo dois).....	42
Figura 16 – Pontos visitados na pesquisa de campo assinalados em amarelo .....	43
Figura 17 – Localização do ponto de referência para a definição da escala de risco a inundações .....	44
Figura 18 – Mapa de risco de desastre por inundação da cidade de São João do Rio do Peixe obtido a partir do modelo HAND originado do MDE SRTM com limiar de drenagem de 2500 pixels .....	45

Figura 19 – Mapa de risco de desastre por inundação da cidade de São João do Rio do Peixe obtido a partir do modelo HAND originado do MDE SRTM com limiar de drenagem de 1 milhão de pixels.....	46
Figura 20 – Mapa de risco de desastre por inundação da cidade de São João do Rio do Peixe obtido a partir do modelo HAND originado do MDE ALOS PALSAR com limiar de drenagem de 51.000 pixels .....	47
Figura 21 – Mapa de risco de desastre por inundação da cidade de São João do Rio do Peixe obtido a partir do modelo HAND originado do MDE ALOS PALSAR com limiar de drenagem de 6 milhões de pixels.....	48
Figura 22 – Pontos de inundação subestimados no HAND MDE ALOS PALSAR de 51 mil pixels - bairro da Estação: (A) vista de um ponto periférico e (B) vista de um ponto no interior .....	50
Figura 23 – Região do bairro da Estação (ponto A) da figura 19) subestimada no HAND ALOS PALSAR de 51 mil pixels.....	50
Figura 24 – Região do bairro da Estação (ponto B) da figura 19) subestimada no HAND ALOS PALSAR de 51 mil pixels.....	51
Figura 25 – Regiões da área de estudo cujo grau de risco foi superestimado no modelo HAND SRTM de 2500 pixels.....	52

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	13
2.1 OBJETIVO GERAL .....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	14
3.1 O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO .....	14
3.2 RISCO E VULNERABILIDADE .....	16
3.3 DESASTRES RELACIONADOS COM OS FENÔMENOS NATURAIS .	17
3.3.1 Inundações.....	18
3.3.2 Os desastres na região semiárida.....	19
3.4 MEDIDAS PARA REDUÇÃO DE RISCO A DESASTRES DE INUNDAÇÕES .....	21
3.4.1 Modelo HAND .....	23
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	25
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	25
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS .....	28
4.2.1 Funcionamento do modelo HAND.....	29
4.2.2 Modelo digital de elevação.....	32
4.2.3 Determinação da sub-bacia de estudo.....	33
4.2.4 Processamento e obtenção da mancha de inundação do Rio do Peixe.....	35
4.2.5 Validação das informações geradas .....	35
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	36
5.1 OBTENÇÃO DAS SUB-BACIAS .....	36
5.2 OBTENÇÃO DO MODELO HAND .....	40
5.2.1 Análise dos resultados obtidos.....	49
5.3 ANÁLISE DO RISCO A PARTIR DO MODELO HAND ADOTADO E POSSÍVEIS SOLUÇÕES PARA SUA REDUÇÃO .....	52
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	54
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	55

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento de áreas urbanas é evidente em todas as regiões do mundo. Esse crescimento, que geralmente ocorre de forma desordenada, acarreta em transformações no meio natural e muitas vezes acabam gerando problemas ambientais, sociais e estruturais que impactam diretamente na vida das pessoas (SANTOS *et al.*, 2016).

No Brasil, os desastres relacionados a fenômenos naturais que mais impactam a população são os ligados à seca e estiagem, às enxurradas e às inundações, respectivamente (UFSC, 2013).

Em relação à região Nordeste, sabe-se que os desastres relacionados à seca e estiagem são os de maiores impactos, principalmente na região semiárida, onde a seca é um fenômeno recorrente e de longa duração.

Entretanto, os desastres ligados às inundações também são recorrentes nessa região do país. Sendo o segundo desastre a mais afetar pessoas na região Nordeste, nos últimos 22 anos a quantidade de pessoas impactadas por inundações foi de, aproximadamente, 4,5 milhões de pessoas (UFSC, 2013).

Na região semiárida, os fenômenos de inundações são menos frequentes que os de seca, porém, são originados devido a característica irregular de suas precipitações, que geralmente ocorrem em grandes volumes e em um curto período de tempo.

No semiárido paraibano, a cidade de São João do Rio do Peixe é uma das áreas que sofre com os problemas recorrentes das inundações. Os impactos gerados são, principalmente devido ao relevo relativamente plano de onde se localiza a mancha urbana, e também por conta de seu desenvolvimento em áreas próximas ao leito do Rio do Peixe que margeia a cidade.

Ligado ao risco de desastres por inundação há o surgimento da necessidade da procura por medidas preventivas e corretivas para a cidade de São João do Rio do Peixe, e outras que por ventura podem apresentar o mesmo problema, visando à redução do impacto negativo causado na sociedade.

Dentre essas medidas, existem as estruturais, que podem ser consideradas medidas corretivas, geralmente ligadas a obras de engenharia; e as medidas não-estruturais, que podem ser preventivas e corretivas e estão ligadas, principalmente ao melhor convívio da população com o rio (JUSTINO, 2019).

No campo das medidas não-estruturais, o desenvolvimento de tecnologias voltadas para a previsão e mapeamento de áreas com população vulnerável a risco de desastres relacionados com fenômenos naturais tem aumentado. É possível encontrar desde metodologias que necessitam do conhecimento de uma grande variedade de dados, como é o caso de modelos hidrodinâmicos, como também metodologias que buscam prever o comportamento dos rios conhecendo apenas a geomorfologia da região, como é o caso do modelo *Height Above the Nearest Drainage* (HAND) (Rennó *et al.*, 2008).

O modelo HAND é um descritor de terreno desenvolvido por pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), onde tem como ideia principal a determinação de um modelo de elevação normalizado em relação à rede de drenagem da área estudada.

Com o modelo HAND é possível prever possíveis áreas suscetíveis a inundações, a partir de um limiar de drenagem mínimo adotado. Essa é uma metodologia de fácil utilização, pois para o seu desenvolvimento é necessário apenas a existência do modelo digital de elevação (MDE) da área que procura-se estudar.

Com isso, ao perceber a necessidade de se mapear e analisar as possíveis áreas com apenas um indivíduo ou com vários deles em situação de vulnerabilidade ao risco de desastres por inundações na cidade de São João do Rio do Peixe, Paraíba, Brasil, foi adotada a metodologia HAND para a realização desta pesquisa.

O intuito principal foi, a partir dos modelos HAND gerados, conseguir estudar quais os níveis de vulnerabilidade ao qual a população da cidade está sujeita, e assim, buscar soluções que possam auxiliar na redução do risco de desastres por inundação.

Além disso, buscou-se realizar uma análise comparativa dos modelos gerados com dados históricos e com outros trabalhos sobre a região, afim de se avaliar o desempenho do modelo HAND na obtenção de resultados para a área estudada.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o risco de desastres por inundação na cidade de São João do Rio do Peixe, Paraíba.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as possíveis áreas suscetíveis ao risco de inundações na cidade de São João do Rio do Peixe, Paraíba, por meio da aplicação do modelo HAND;
- Avaliar a influência do modelo digital de elevação (MDE) no resultado final do modelo HAND;
- Desenvolver uma escala de suscetibilidade ao risco a inundação a partir dos resultados obtidos e gerar um mapa de vulnerabilidade por meio da classificação das áreas da cidade baseada nessa escala;

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO

O processo de urbanização é um fenômeno crescente em todas as partes do mundo. Segundo o relatório Cidades do Mundo (UNOHABITAT, 2016) a taxa de crescimento mundial da população urbana nos últimos 20 anos foi de 2,16%, sendo a taxa dos países latino americanos de 1,74%.

De acordo com UN-HABITAT (2016), entre 1995 e 2015 ocorreu um grande crescimento na quantidade de grandes e mega cidades no mundo, as quais passaram de 22 e 14 em 1995, para 44 e 29 em 2015, respectivamente.

Diferentemente das nações consideradas desenvolvidas, os países latino americanos passaram por um processo de urbanização acelerado e abrupto causado pela manutenção do atraso agrícola em certas áreas, convivendo com a modernização agrícola em outras, responsáveis pelo imenso êxodo rural e pela transformação dos países predominantemente rurais em majoritariamente urbanos (CANO, 1989).

No Brasil, a urbanização ocorreu principalmente a partir da segunda metade do século 20, onde foi verificada a transição do país de sua fase rural e agrícola para sua fase urbana e metropolitana (MARTINE; MCGRANAHAN, 2010).

Uma das regiões que mais passou pelo processo do êxodo rural foi a região Nordeste, principalmente devido aos problemas enfrentados por longos períodos de seca e estiagem. As pessoas dessa região migravam sobretudo, para a região Sudeste do país na procura de melhoria de vida.

Entretanto, além do êxodo para outras regiões, as cidades litorâneas e metropolitanas nordestinas também sofreram um grande movimento de migração, onde entre 1950 e 2010, a urbanização da região praticamente triplicou e saiu de 26,4% para 73,13%, respectivamente. (FONSECA, 2016). Apesar desse crescimento na taxa de urbanização, a região Nordeste ainda é a região menos urbanizada do país, segundo o Censo demográfico de 2010.

No Brasil, de acordo com o Projeto de Lei do Senado (PLS) 316/09 (BRASÍLIA, 2009), um município é considerado de grande porte se possuir mais de 100 mil habitantes; de médio porte, se a população for entre 50 mil e 100 mil; e de pequeno porte, se tiver menos de 50 mil habitantes.

O estado da Paraíba é composto por 223 municípios, sendo a maioria de médio e pequeno porte. João Pessoa, capital do Estado é a única cidade com mais de 500 mil habitantes e é considerada de grande porte.

Assim como os demais estados da região Nordeste, o processo de urbanização do estado da Paraíba foi marcado pela grande migração da população da região semiárida para a região litorânea.

O que comprova isso é que, ao analisar a população dos municípios paraibanos, percebe-se que as cidades mais populosas do Estado estão localizadas na Zona da Mata, hoje chamada de Região Intermediária de João Pessoa, segundo IBGE (2017), ou próximo dela (Região Intermediária de Campina Grande), que são as cidades de João Pessoa, Santa Rita e Campina Grande.

A região semiárida paraibana possui 194 municípios, em que apenas 3 são considerados cidades de médio porte, e sendo Campina Grande e Patos as únicas cidades de grande porte, com uma população estimada em 2019 de 409.731 e 107.605 habitantes, respectivamente (IBGE, 2019).

Esse fato mostra como o êxodo rural no Estado foi um fenômeno de grande impacto. Isto evidencia como a seca possui grande influência no desenvolvimento das cidades dessa região. Pois, percebe-se que geralmente estas cidades estão localizadas próximas a reservatórios criados pelo ser humano ou próximas de rios.

Sabe-se que o crescimento urbano brasileiro ocorreu de forma desordenada, ocupando morfologicamente áreas inadequadas, bem como por práticas que não respeitam as dinâmicas naturais dos processos morfodinâmicos (SUERTEGARAY; NUNES, 2001 *apud* PEDRO; NUNES, 2012).

O crescimento desordenado é uma característica comum aos centros urbanos brasileiros. Nota-se que nas mais diversas regiões do país a problemática das cidades tem relação com a infraestrutura, como por exemplo, problemas de saneamento básico, tráfego e drenagem; além de problemas também relacionados a fenômenos naturais, como é o caso de chuvas intensas que, com recorrência em alguns locais, ocasionam desastres por alagamento, inundação e movimentação de massa.

Esse estilo de urbanização característico dos países subdesenvolvidos é responsável pela criação de cidades com populações vulneráveis, aos mais diversos problemas sociais e ambientais, os quais são responsáveis pelo aumento da exposição aos riscos de diversas naturezas.

Segundo Filgueira e Barbosa (2013),



As condições de vulnerabilidade estão representadas pela pobreza, a desorganização social, as ideologias fatalistas, a ausência de sistemas institucionalizados de segurança do cidadão, a falta de controle e de normativas sobre o uso do solo urbano e rural, adaptadas para as infraestruturas urbana e rural existentes. Os contextos de vulnerabilidade significam um desajuste ao meio físico de tal grau que este se converte em uma ameaça e, conseqüentemente, em um fator de geração de risco (FILGUEIRA; BARBOSA, 2013, p. 9).

### 3.2 RISCO E VULNERABILIDADE

O risco está presente na sociedade de várias formas, seja relacionado a uma atividade cotidiana, seja relacionado a problemas sociais ou estruturais de uma sociedade.

Os riscos são classificados em naturais, quando são provenientes de forças da natureza, como são o caso de tsunamis, terremotos, inundações etc; tecnológicos, quando passam a existir devido a atividade humana, como por exemplo, explosões; e sociais, que são originários de diversos movimentos sociais (guerras, atentados etc) (MENDONÇA; LEITÃO, 2008).

No âmbito dos desastres que erroneamente são chamados de “naturais”, há uma discussão sobre o significado de risco, onde, segundo UFSC (2012), risco é a medida de danos ou prejuízos potenciais, expressa em termos de probabilidade estatística de ocorrência e de intensidade ou grandeza das conseqüências previsíveis.

O risco é proveniente da coexistência entre a ameaça e a vulnerabilidade. De acordo com Wilches-Chaux (1998) *apud* Medeiros e Barbosa (2016), não se pode definir um cenário de risco como estático, visto que este é resultado de fatores dinâmicos e mutáveis.

Além disso, ao considerar que o risco é uma função das ameaças e vulnerabilidades a que uma sociedade está exposta, compreende-se que a magnitude do risco depende diretamente do grau de vulnerabilidade e da amplitude das ameaças existentes, o que torna o risco bastante variável e heterogêneo dependendo do grau de desenvolvimento do objeto de estudo. (LAVELL, 2002).

Para Granjo (2006), ameaça se refere “a qualquer factor passível de causar dano à integridade de pessoas, seres ou coisas, desde que a sua existência seja percebida, ainda que de forma vaga.”

Segundo Wilches-Chaux (1998) *apud* Medeiros e Barbosa (2016), ameaça é a probabilidade de que um fenômeno seja capaz de desencadear um desastre, caso ocorra.

Para UFSC (2012), vulnerabilidade é definida como sendo:

conjunto de características de um cenário, resultantes de fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais, que aumentam a sua possibilidade de sofrer danos e prejuízos em consequência de um evento. Características e circunstâncias de uma comunidade, sistema ou bem que os fazem susceptíveis aos efeitos danosos de uma ameaça (UFSC, 2012, p. 40).

Já de acordo com Vargas (2002) *apud* Filgueira (2013), vulnerabilidade é a disposição interna a ser afetada por uma ameaça, onde ela é função do grau de exposição, da proteção, da reação imediata, da recuperação básica e da reconstrução do impacto de uma ameaça natural.

Ao falar em riscos ligados a desastres, Filgueira (2013) ainda afirma que:

Os riscos de desastres não estão relacionados unicamente com a probabilidade de que ocorra o evento natural desencadeante do processo destrutivo, mas também com os níveis de ameaça associados com esse fenômeno (inundações, secas, deslizamentos de terra, etc), em lugares específicos e à vulnerabilidade da atividade social e econômica e da infraestrutura em áreas susceptíveis à ameaça (FILGUEIRA, 2013, p. 2).

### 3.3 DESASTRES RELACIONADOS COM OS FENÔMENOS NATURAIS

Ligado à exposição de uma sociedade aos diversos riscos relacionados aos fenômenos naturais, uma sociedade ou ambiente vulnerável são os pontos de partida para a ocorrência de desastres dos mais diversos tipos.

Para Castro (1998), desastre é o

resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema vulnerável, causando danos humanos, materiais e ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais (CASTRO, 1998, p. 2).

Os desastres ditos “naturais” são aqueles ligados aos fenômenos da natureza, como é o caso das inundações, escorregamentos, secas, furacões, tsunamis etc.

No Brasil, os principais desastres ligados a fenômenos naturais são os de inundações, enxurradas, alagamentos movimentos de massa, erosões, ciclones e vendavais, granizo, secas e estiagens, tornados, geadas e incêndios florestais.

Em relação à proporção dos danos causados por esses desastres, segundo o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (UFSC, 2013), as secas e estiagens são os que mais afetam a população brasileira, seguidos por enxurradas e inundações.

As secas são caracterizadas principalmente por longos períodos com baixos índices pluviométricos, que acabam gerando grandes reduções nos volumes de reservatórios e corpos hídricos. Essas reduções ocasionam problemas ligados à escassez de água tanto para o abastecimento humano como também para a sobrevivência de animais e da vegetação do local atingido.

Em contrapartida à falta de chuvas, o seu excesso também é responsável por fenômenos como enchentes e inundações, cuja esta última é diretamente ligada ao risco a desastres, principalmente em áreas urbanas.

### 3.3.1 Inundações

Geralmente, enchentes e inundações são termos utilizados como sinônimos do fenômeno de um rio aumentar sua vazão ao ponto de inundar ou "alagar" determinada região. Entretanto, segundo Goerl e Kobiyama (2005) as enchentes ocorrem quando as águas de um rio atingem as suas margens sem transbordar para áreas adjacentes; já as inundações ocorrem quando essas águas acabam transbordando para essas áreas.

Tucci (2003) define inundação como sendo um fenômeno que

ocorre quando as águas dos rios, riachos, galerias pluviais saem do leito de escoamento devido a falta de capacidade de transporte de um destes sistemas e ocupa áreas onde a população utiliza para moradia, transporte (ruas, rodovias e passeios), recreação, comércio, indústria, entre outros (TUCCI, 2003, p. 45)

Diferentemente do fenômeno da seca, que é caracterizado como sendo um fenômeno lento e gradual, geralmente as inundações ocorrem em um curto período de tempo, causando grandes desastres como é o caso de encharcamento do solo que pode promover deslizamentos de terra, destruição de moradias e vias públicas, transbordamento de águas pluviais etc.

Ainda segundo Tucci (2003), há dois tipos de inundações: a ribeirinha e a inundação na drenagem urbana; sendo as duas ligadas ao processo de urbanização e que podem ocorrer de forma simultânea ou de forma isolada.

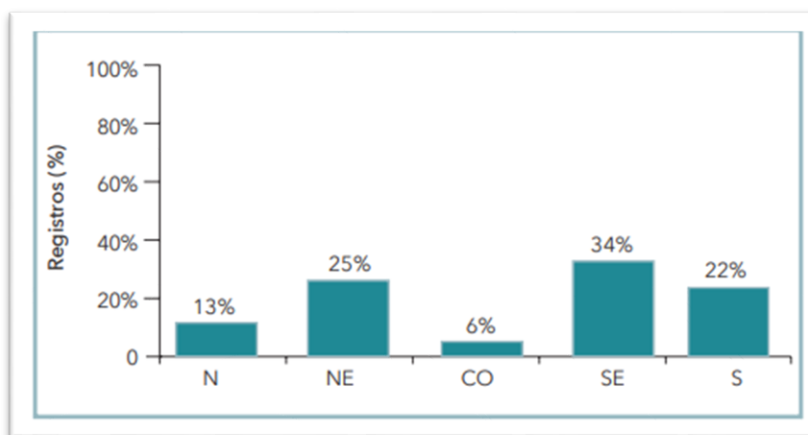
As inundações ribeirinhas são definidas como sendo as originárias devido a precipitações intensas e a incapacidade de infiltração do solo, que acaba gerando um escoamento superficial para o sistema de drenagem superior à capacidade de escoamento, inundando assim, as áreas próximas aos rios.

Já as inundações na drenagem urbana são caracterizadas como sendo as geradas a partir do processo de impermeabilização do solo e aceleração do escoamento superficial através de condutos e canais, que acabam gerando uma grande quantidade de água chegando ao mesmo tempo no sistema de drenagem.

Apesar de a ocorrência desse tipo de fenômeno ser menor que a ocorrência de secas, todas as regiões do Brasil também já passaram por algum período de inundação.

Segundo o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (UFSC, 2013), a região que mais possui registros de inundações é a região Sudeste, sendo o Nordeste a ocupar a segunda posição, contradizendo o senso comum de que a região Nordeste possui problemas apenas relacionados à seca (Figura 1).

**Figura 1 - Percentual de ocorrências de inundações em cada região do país**



Fonte: Brasil (2013) apud UFSC (2013).

### 3.3.2 Os desastres na região semiárida

Como já dito, o fenômeno da seca afeta todo o país. Porém, sabe-se que a região Nordeste é a mais afetada pelos desastres relacionados à seca. Sendo a área mais recorrente a região semiárida, há relatos de grandes períodos de seca desde 1552.

A região semiárida brasileira é caracterizada, principalmente pela sua convivência com problemas relacionados à escassez hídrica. De acordo com a Resolução nº 107/2017, do Ministério da Integração Nacional, hoje chamado Ministério do Desenvolvimento Regional, para que um município seja considerado parte do semiárido brasileiro (SB), é necessário que ele tenha precipitação média anual igual ou inferior a 800 mm, ou Índice de Aridez menor ou igual a 0,5, ou percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60% (BRASIL, 2017).

Entretanto, apesar de a seca ser a principal problemática do SB, essa região também possui um histórico de problemas relacionados às inundações, mesmo que em menor quantidade que os registros de seca.

Para Sousa (2013), as particularidades do semiárido brasileiro se dão, principalmente devido às irregularidades das precipitações, cuja concentração ocorre em apenas 4 a 5 meses do ano, tornando o ambiente semiárido.

Devido a essas irregularidades, geralmente as inundações em regiões semiáridas estão ligadas aos grandes volumes precipitados em um curto período de tempo, que muitas vezes são agravados devido à ocupação dos leitos dos rios pela população e também devido à própria topografia.

A relação do volume de precipitação com os eventos de inundações na região semiárida paraibana foi relatada por Sousa (2013), onde é possível perceber que para as cidades estudadas, os eventos de inundações registrados entre 1972 e 2009 estão sempre ligados a precipitações anuais próximas de 1.000 mm (Tabela 1).

**Tabela 1 – Eventos de inundações em cidades da bacia hidrográfica do Rio do Peixe – PB, ligados aos grandes volumes de precipitações**

Ano	Cajazeiras	Uiraúna	Sousa	Aparecida	S. J. Rio do Peixe	Episódio
1972	946,9	-	-	-	999,0	-
1973	1017,1	-	-	-	-	-
1974	1346,2	1233,6	-	-	**1158,8	-
1975	1100,4	960,0	-	-	959,3	-
1977	**1301,8	1050,0	1401,2	-	1296,1	**Inundação
1978	1283,8	-	877,5	-	938,7	-
1979	883,4	-	832,7	-	-	-
1980	852,7	839,7	-	-	-	-
1981	824,5	-	-	-	-	-
1982	944,9	-	-	-	-	-
1984	-	965,0	919,4	-	901,0	-
1985	-	**1604,2	**1579,8	**1653,2	**1482,0	**Inundação
1990	871,6	820,6	914,4	920,0	976,3	-
1994	1238,7	848,9	1092,4	838,3	990,7	-
1995	928,0	822,6	1016,6	920,4	938,5	-
1996	1382,5	947,7	1224,8	881,4	**1112,8	**Inundação
1997	1137,3	-	852,7	-	922,0	-
1999	1169,0	-	895,3	998,1	806,2	-
2000	1331,1	1113,0	1164,7	987,4	**1335,3	**Inundação
2002	1026,7	1091,9	1091,2	-	1037,0	-
2003	920,0	-	-	-	-	-
2004	1234,8	1055,5	1075,0	808,0	1060,6	**Inundação
2006	1096,4	839,4	1129,4	808,8	1242,6	**Inundação
2007	885,0	-	803,4	-	-	-
2008	**1709,1	-	**1750,0	**	**1269,6	**Inundação
2009	-	-	-	-	1 313,0	**Inundação

Fonte: Sousa (2013).

Sousa (2013) ainda relatou que nos dois últimos anos de registros de inundações (2008 e 2009), os danos causados por esses eventos deixou um total de 18.467 pessoas desabrigadas nessa região estudada, além de perdas no setor da agricultura e danificação de estradas, redes de abastecimento etc. Isso comprova como a região semiárida brasileira também convive com os problemas causados por desastres ligados a inundações.

### 3.4 MEDIDAS PARA REDUÇÃO DE RISCO A DESASTRES DE INUNDAÇÕES

Os eventos de inundações acarretam em grandes impactos para as populações afetadas, seja no âmbito social, material ou ambiental.

Por esse motivo, a preocupação com os efeitos desse tipo de evento acaba instigando a procura por soluções que minimizem os riscos e também os impactos gerados pelas inundações.

Para Filgueira; Silva; Rosendo (2019), o entendimento da natureza física e histórica dos eventos naturais e dos fatores sócio-econômico-culturais e também das

políticas que moldam o impacto desses eventos sobre as comunidades vulneráveis é de grande importância para a redução dos riscos a desastres.

Segundo Andrade Filho; Széliga; Enomoto (2000)

para mitigar ou acabar com os problemas causados pelas inundações utiliza-se o controle de inundações que é um conjunto de medidas que tenham por objetivo minimizar os riscos a que as populações estão sujeitas, diminuindo os prejuízos causados por inundações e possibilitando o desenvolvimento urbano de forma harmônica, articulada e sustentável (ANDRADE FILHO; SZÉLIGA; ENOMOTO, 2000, p. 72).

As medidas ligadas ao controle de inundações são classificadas em medidas estruturais e não-estruturais. As medidas estruturais são definidas como sendo medidas essencialmente construtivas, sendo utilizadas para o controle das enchentes e inundações. As medidas não-estruturais são as adotadas com a intenção de uma melhor convivência da população com os eventos, onde realiza-se a prevenção e previsão, realocação da população e controle do uso do solo (ANDRADE FILHO; SZÉLIGA; ENOMOTO, 2000).

Segundo Enomoto (2004) as medidas estruturais são medidas onerosas e que sozinhas não são soluções eficazes e sustentáveis para os problemas ligados às inundações e à drenagem urbana.

Por isso, para Barbosa (2006) *apud* Justino (2019) as medidas estruturais e não-estruturais são complementares, onde boas estratégias de combate aos problemas de inundações combinam esses dois tipos de medidas.

Em relação às medidas não-estruturais, a partir da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (BRASIL, 2012), o Brasil tem avançado no desenvolvimento de políticas e planos que visam a redução dos riscos a desastres como um todo. Segundo Pozzer; Mazzega (2014) as ações desenvolvidas para a redução de riscos a inundações são pautadas em quatro eixos de atuações: prevenção; mapeamento; monitoramento e alerta; e resposta a desastres.

Em relação ao eixo de atuação de mapeamento, sabe-se que o mapeamento de áreas com populações vulneráveis a risco de desastres relacionados com fenômenos naturais é uma importante ferramenta para a realização do controle, gestão e prevenção de inundações, visto que é uma ferramenta de baixo custo quando relacionada com os custos gerados por medidas estruturais.

Além disso, para Veyret (2007), assinalar o risco em um mapa equivale a afirmar o risco no espaço em questão, onde Goerl; Kobiyama; Pellerin (2012) afirmam que a partir dos mapas de áreas de risco:

é possível elaborar medidas preventivas, planificar as situações de emergência e estabelecer ações conjuntas entre a comunidade e o poder público, com o intuito de promover a defesa permanente contra os desastres naturais (GOERL; KOBİYAMA; PELLERIN, 2012, p. 85).

### 3.4.1 Modelo HAND

Uma forma de realizar o mapeamento de áreas propensas a risco de desastres por inundação é utilizando o modelo descritor de terreno *Height Above the Nearest Drainage* (HAND).

Desenvolvido por pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o HAND foi criado com o intuito de se obter informações hidrológicas de uma área a partir de suas informações topográficas, utilizando como dado de entrada o modelo digital de elevação (MDE) do objeto que se busca estudar (Rennó et al. 2008).

Para Momo *et al.* (2016), o modelo HAND é

uma normalização topográfica da paisagem que usa como entrada o Modelo Digital do Terreno (MDT) e fornece como saída um novo MDT normalizado, que pode ser classificado de acordo com distâncias verticais relativas aos cursos d'água mais próximos (Momo *et al.*, 2016, p. 201).

Uma vantagem dessa ferramenta em relação aos modelos hidrodinâmicos tradicionais é o fato de seu desempenho não depender de dados históricos de inundações anteriores ou de dados hidrológicos, o que torna o HAND uma ferramenta de baixo custo e acessível a qualquer região que possua dados topográficos disponíveis (RENNÓ *et al.*, 2008; NOBRE *et al.*, 2016).

Por ser um descritor de terreno, o HAND já foi bastante utilizado em estudos com o intuito de classificar a topografia de uma determinada região de acordo com suas características hidrológicas.

São exemplos desse tipo de análise, os trabalhos desenvolvidos por Gharari *et al.* (2011), que realizaram a classificação hidrológica do relevo de uma bacia hidrográfica na região central da Europa, avaliando o desempenho do modelo HAND de acordo com a resolução do MDE de entrada. E Nobre *et al.* (2011), que aplicou a metodologia na classificação do tipo de solos na região da Amazônia.



Arelado a outras ferramentas e metodologias, o modelo HAND também está sendo bastante utilizado em pesquisas ligadas ao mapeamento de áreas propensas a risco de desastres, onde este modelo já foi adotado tanto em projetos brasileiros como em projetos de outros países (NOBRE *et al.*, 2016; MILANESI *et al.*, 2017).

Referente aos projetos brasileiros há, por exemplo, a aplicação do HAND no projeto "Vulnerabilidade das Megacidades Brasileiras às Mudanças Climáticas" que se estendeu entre o período de 2008 e 2011, onde foi realizado um estudo interdisciplinar para se identificar vulnerabilidades às mudanças climáticas nas capitais de São Paulo e Rio de Janeiro (NOBRE *et al.*, 2010; MILANESI *et al.*, 2017); e no projeto de mapeamento da lama gerada devido ao rompimento da barragem da Mina do Córrego do Feijão em Brumadinho, Minas Gerais, em 2019 (INPE, 2019).

Inicialmente, os estudos que aplicavam o modelo HAND eram feitos utilizando os MDEs da missão SRTM, como é o caso de Rennó *et al.* (2008), que foi o estudo pioneiro do HAND, aplicado em uma área de 37 km<sup>2</sup> na região da Amazônia; Cuartas *et al.* (2012), realizado na sub-bacia hidrográfica do Asu, também na Amazônia; e Pires e Borma (2013), aplicada em uma região do Cerrado.

Nesses estudos utilizando dados SRTM, o desempenho do modelo HAND foi considerado satisfatório para as áreas estudadas, porém, percebeu-se também que a resolução do MDE possui influencia no resultado final, principalmente em áreas de estudo de pequenas extensão, onde os modelos digitais de elevação acabam omitindo valores de declividade do terreno (Pires; Borma, 2013).

Devido a necessidade de se avaliar o real impacto do MDE no resultado final do modelo HAND, surgiram alguns estudos visando realizar essa análise por meio da utilização de modelos digitais de elevação de alta resolução.

Os estudos pioneiros na utilização de MDE de alta resolução foram Nobre *et al.* (2016), Momo *et al.* (2016), e Goerl *et al.* (2017). Esses três trabalhos buscaram avaliar o impacto da resolução do MDE no resultado final do modelo HAND, onde relacionaram as manchas geradas pelo modelo com dados históricos de inundações passadas.

Nobre *et al.* (2016) utilizaram um MDE de resolução de 1 m para a cidade de Blumenau, em Santa Catarina; Momo *et al.* (2016) aplicaram um MDE de resolução de 0,39 m nos municípios de Brusque e Blumenau; e Goerl *et al.* (2017) adotaram um MDE com resolução de 2,5 m para o município de Igrejinha, no Rio Grande do Sul.

Além disso, no estado da Paraíba, o HAND foi utilizado no mapeamento de áreas de inundações na bacia hidrográfica do Rio Cuiá, na cidade de João Pessoa (ALVES, 2019), e também na análise do impacto nos fenômenos de inundações devido à construção de um dique na cidade Cruz do Espírito Santo (JUSTINO, 2019).

Esses estudos utilizaram modelos digitais de elevação obtidos por meio de aerofotogrametria realizada com a utilização de drones, que resultam em MDEs de alta resolução. Alves (2019) adotou um MDE de resolução de 0,26 m e Justino (2019), um MDE com resolução igual a 0,27 m.

Por esses estudos foi observado que o desempenho do modelo HAND foi satisfatório para as áreas aplicadas. Apesar disso, foi observado também que a extensão da área estudada e da área considerada como parte da rede de drenagem (limiar de drenagem) também possui influência no resultado final.

Goerl *et al.* (2017) afirmam que para a área estudada, de aproximadamente 136 km<sup>2</sup>, a resolução do MDE não possuiu grande influência no resultado final do modelo HAND, porém, para eles, o HAND se mostrou bastante sensível em relação à adoção do valor do limiar de drenagem. Entretanto, Justino (2019) concluiu que para áreas pontuais, como foi o caso do seu estudo que analisou uma área de 0,9 km<sup>2</sup>, a resolução do MDE possui impacto direto no resultado final do modelo. Isso se dá devido aos erros existentes nos modelos digitais que surgem por meio da influência de artefatos no resultado final do MDE (Justino, 2019).

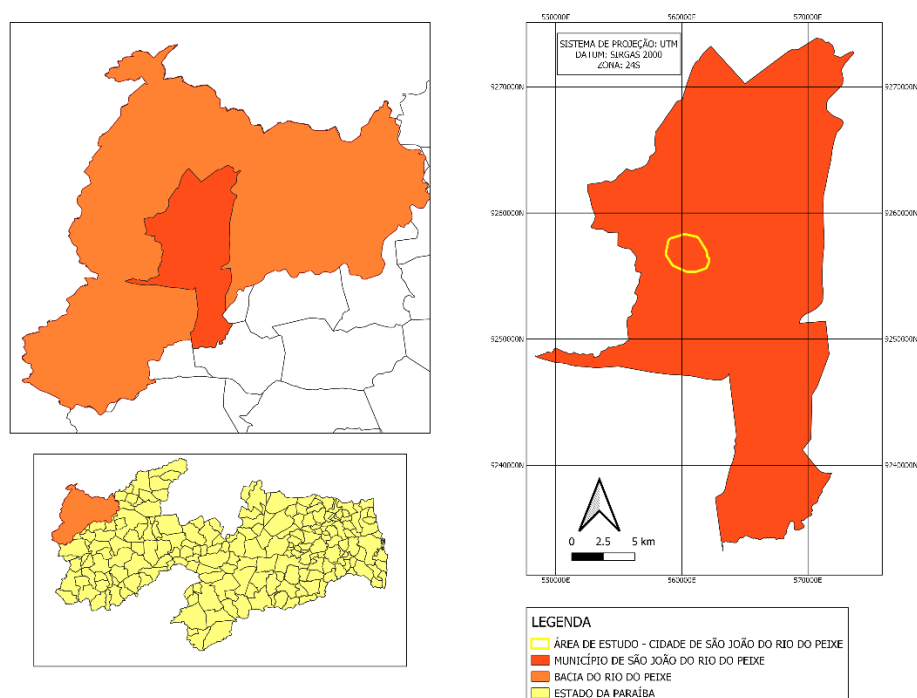
## **4 METODOLOGIA**

### **4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo deste trabalho foi a zona urbana do município de São João do Rio do Peixe, localizado na bacia hidrográfica do Rio do Peixe, na região semiárida do estado da Paraíba.

A bacia hidrográfica do Rio do Peixe faz parte da bacia hidrográfica do Rio Piranhas, situada no extremo Noroeste do Estado, possuindo uma área de, aproximadamente, 3.475,74 km<sup>2</sup>, sendo a nascente do Rio do Peixe no município de Uiraúna e seu deságue no município de Sousa (Figura 2).

**Figura 2 - Localização do município de São João do Rio do Peixe**



Fonte: elaborada pela autora.

Segundo o IBGE (2020), São João do Rio do Peixe possui uma área territorial de, aproximadamente, 473,75 km<sup>2</sup>, com a população registrada no Censo demográfico de 2010 de 18.201 habitantes, sendo a população urbana igual a 6.885 habitantes, o equivalente a 37,83% da população total do município.

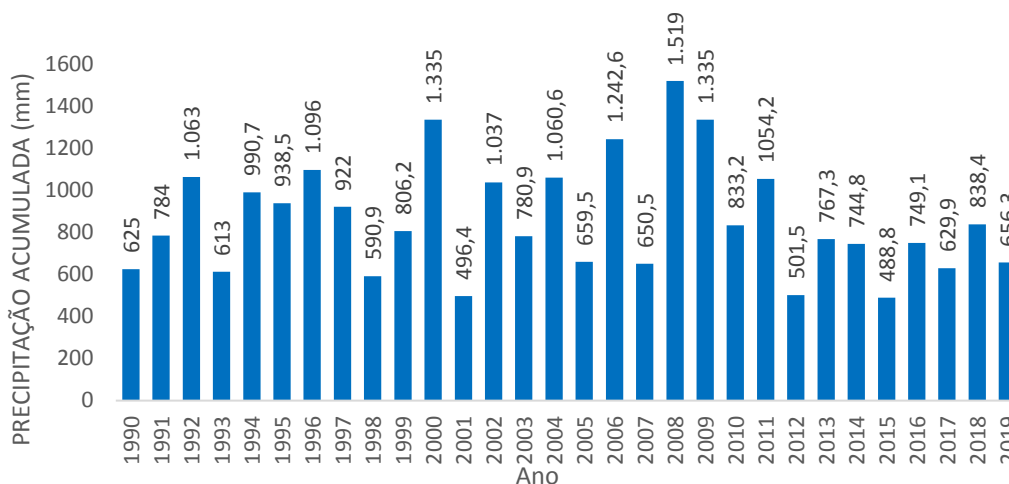
De acordo com RADAMBRASIL (1981) *apud* PEREIRA (2009), a região semiárida paraibana possui dois tipos climáticos, em que o município de São João do Rio do Peixe se enquadra no “Clima Tropical Chuvoso”, caracterizado como sendo quente e úmido, com chuvas concentradas no verão e precipitações máximas no outono.

Assim como os demais municípios do semiárido brasileiro – que segundo Sousa (2013), é uma região caracterizada por possuir precipitações concentradas em 4 ou 5 meses do ano –, o município de São João do Rio do Peixe concentra seu maior volume de precipitações os meses de março e junho (Pereira, 2009).

Além disso, São João do Rio do Peixe teve precipitação acumulada anual média igual a 860,33 mm, de acordo com os dados dos últimos 30 anos (PEREIRA, 2009; AESA, 2019).

Percebe-se também a existência de anos excepcionais, onde a precipitação acumulada anual registrada foi maior que 1.000 mm (Figura 3), como é o caso dos anos de 2008 e 2009, que foram anos marcados por eventos de inundações.

**Figura 3 - Precipitação acumulada anual do município de São João do Rio do Peixe - PB nos últimos 30 anos**



Fonte: Pereira (2009); AESA (2019).

Em relação à geomorfologia, a área de estudo está localizada na Sub-Bacia Sedimentar De Sousa, cujo relevo é considerado predominantemente plano a suavemente ondulado.

A sua vegetação é caracterizada como sendo do tipo xerófila, que pertence ao bioma Caatinga, onde possui um aspecto homogêneo, geralmente de porte arbóreo e arbustivo (PARAÍBA, 1996).

Em particular, a cidade de São João do Rio do Peixe (Figura 4):

está localizada na margem esquerda do médio curso do Rio do Peixe. Na realidade, o sítio escolhido para a fundação da cidade, desde a formação do povoado em meados de 1860 estendendo-se até os dias atuais, corresponde, em parte, a um importante trecho da planície fluvial do médio curso Rio do Peixe, mais precisamente, a área que os autores denominam de Leito Maior Excepcional. Por outra, os setores nordeste e noroeste do sítio urbano correspondem à área drenada pelo riacho Olho D'Água que contorna esta parte da cidade e deságua no trecho do rio do Peixe localizado ainda no perímetro urbano da cidade. Já na sua porção sudoeste esse tem como tributário o riacho Cacaré (PEREIRA, 2009, p. 67).

**Figura 4 - Localização da rede de drenagem do Rio do Peixe próxima à cidade de São João do Rio do Peixe**



Fonte: elaborada pela autora.

Os problemas gerados devido às inundações também impactam a cidade de São João do Rio do Peixe, onde há registros desde a década de 1940 (PEREIRA, 2009).

Entretanto, a partir dos anos de 1970, com o processo de urbanização e a ocupação de áreas próximas ao leito do Rio do Peixe, a situação foi agravada, intensificando não apenas os problemas de inundações mas também problemas ambientais e problemas urbanos ligados a saneamento básico (SOUSA, 2013).

## 4.2 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

Com o propósito de realizar a análise dos riscos gerados devido aos fenômenos de inundações na cidade de São João do Rio do Peixe, foi utilizado o modelo HAND para a obtenção da mancha de inundação da porção do Rio do Peixe que se localiza próxima à área de estudo.

Para a criação do modelo HAND da área de estudo foi utilizada a extensão TerraHidro 4.4 do *software* Terraview, que é uma ferramenta SIG desenvolvida pelo INPE.

Com o TerraHidro é possível se desenvolver trabalhos ligados à modelagem hidrológica, e segundo INPE (2020) suas principais funcionalidades são a extração de redes de drenagem; a delimitação de áreas de contribuição para pontos isolados ou segmentos de drenagem; e a delimitação de lençóis freáticos e de áreas de inundação, por meio do modelo HAND.

#### 4.2.1 Funcionamento do modelo HAND

Como já mencionado, o HAND é um algoritmo que pode ser utilizado para a estimativa de níveis de inundações, tendo como dados de entrada o MDE e a definição do limiar de drenagem da área de estudo.

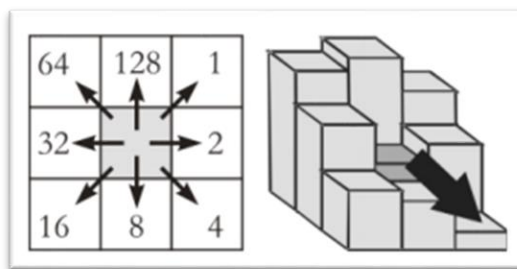
Sabe-se que o modelo HAND é obtido a partir da normalização do MDE da área de estudo em relação a um canal de drenagem (Momo *et al.*, 2016). Essa normalização é realizada por meio da diferença entre a altitude do terreno e a altitude do canal de drenagem mais próximo, onde é possível notar que:

quanto mais próximo de um canal um local estiver e também quanto menor a variação altimétrica entre o canal e este local, maior a suscetibilidade do mesmo às inundações (GOERL; MICHEL; KOBAYAMA, 2017, p. 64).

Para a realização da normalização do MDE e, conseqüentemente, da obtenção do modelo HAND, segundo Momo *et al.* (2016), inicialmente é necessário se determinar a matriz de “direção de fluxo de drenagem” (LDD, da sigla em inglês) da área de estudo e realizar a correção do modelo digital de elevação, afim de eliminar falhas que podem influenciar na determinação da direção correta do fluxo de drenagem.

A LDD é obtida, primeiramente, definindo-se o ponto mais baixo do MDE, o qual será considerado o exutório do canal. Após a definição do exutório, é aplicado a metodologia *Deterministic Eight-Neighbors* (D8) (Figura 5) proposta por O’Callaghan; Mark (1984) *apud* ALVES (2019), onde determina-se a direção do fluxo do canal analisando-se os oito pontos vizinhos para cada ponto da matriz, em que a direção adotada é a de maior declividade, isto é, na direção do vizinho com valor mais baixo.

**Figura 5 – Determinação da direção de fluxo do canal de drenagem pelo método D8**



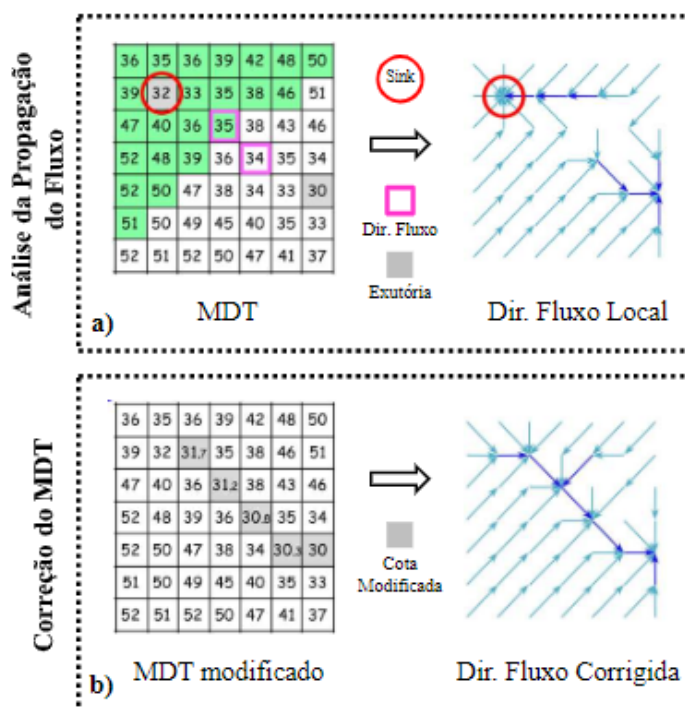
Fonte: Buarque (2009).

Durante essa determinação do fluxo do canal, há a identificação dos pontos considerados *sinks*, que são:

áreas que podem ser naturais (como no relevo cárstico) ou mais comumente são ruídos dos dados ou artefatos criados durante o processamento topográfico na geração do MDT. Os últimos ocorrem quando há incoerência do valor altimétrico no dado topográfico, em alguns pontos da grade, causando interrupção da rede de drenagem (Momo *et al*, 2016, p. 202).

Por esse motivo, é necessário realizar a correção do MDE a partir da remoção dos *sinks* (Figura 6), utilizando processos de regularização de drenagem, onde deve-se reduzir (*breach*) ou aumentar (*fill*) os valores das cotas dos seus pontos vizinhos em direção ao exutório.

**Figura 6 – Procedimento de correção de incoerências do MDE e determinação da LDD**



Fonte: GOERL; MICHEL; KOBAYAMA (2017) adaptado de Nobre et al. (2011).

Nobre *et al.* (2011) afirmam que a correção do MDE é um ponto crucial para o bom desempenho do modelo HAND, visto que as altitudes do canal de drenagem são utilizadas para calcular a alturas normalizadas do sistema em estudo.

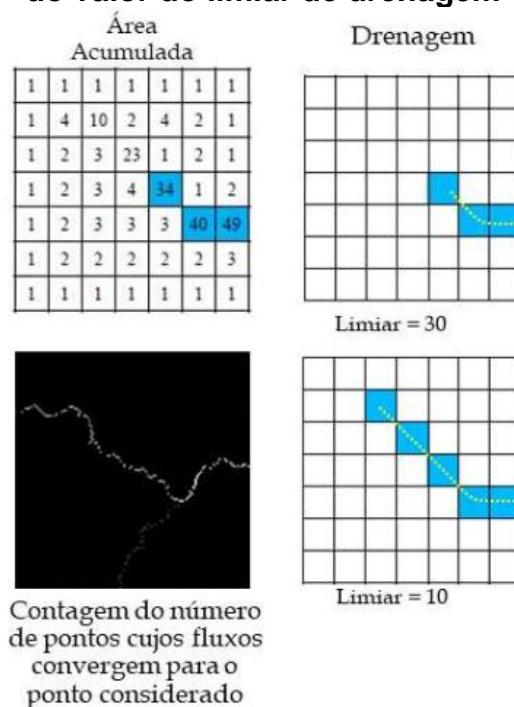
Após a correção do MDE e a determinação da LDD, constrói-se a matriz de área acumulada do canal, que é obtida por meio do cálculo da área acumulada de cada ponto da matriz de direções.

Esse cálculo é feito considerando a direção de fluxo determinada na LDD, onde o valor de cada ponto da matriz de área acumulada é igual ao número de pixels da matriz LDD que convergem para cada ponto.

Com a matriz de área acumulada e adotando-se um limiar de drenagem, é possível obter a matriz de rede de drenagem, que é um dos dados de entrada para a criação da matriz HAND.

O limiar de drenagem é um ponto da matriz de área acumulada adotado como sendo o ponto mínimo da rede de drenagem que se busca determinar. É a partir dele que é possível definir a rede de drenagem, que será formada pelos pontos que possuem valores maiores que o limiar considerado (Figura 7).

**Figura 7 – Determinação da matriz de rede de drenagem a partir da definição do valor do limiar de drenagem**



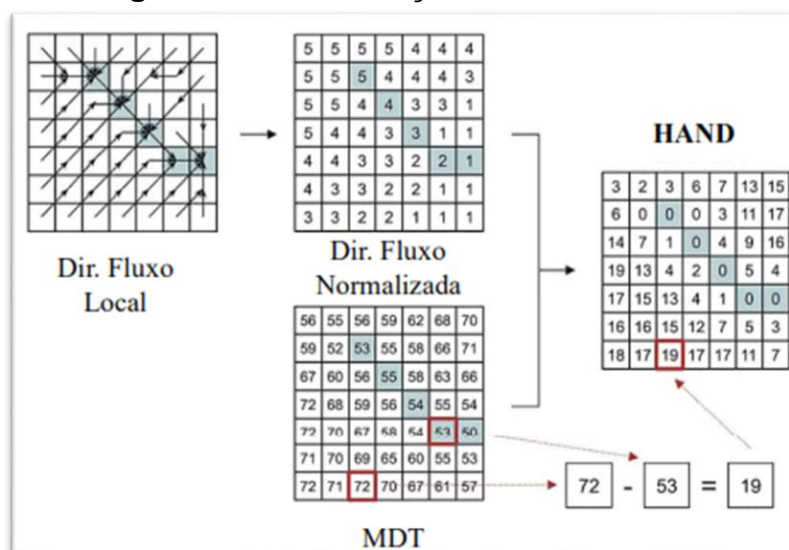
Fonte: Milanese *et al.* (2017).



Para Momo *et al.* (2016) e Goerl *et al.* (2017) quanto maior o valor do limiar adotado, menor será a grade que forma a rede de drenagem, o que é responsável por definir o grau de detalhamento do canal estudado.

Com isso, a partir da obtenção da rede de drenagem é possível gerar a matriz HAND procurada (Figura 8), onde utilizando o MDE de entrada calcula-se a diferença de valores entre os pontos da rede de drenagem e os demais pontos do MDE. E por fim, zera-se os valores dos pontos que compõem a rede de drenagem, onde os demais pontos terão valores iguais à diferença calculada anteriormente.

**Figura 8 - Determinação da matriz HAND**



Fonte: GOERL; MICHEL; KOBIYAMA (2017) adaptado de Nobre et al. (2011).

#### 4.2.2 Modelo digital de elevação

Como já dito anteriormente, o dado de entrada para a obtenção da matriz HAND é o modelo de elevação digital (MDE) da área objeto de estudo. Neste trabalho foram utilizados dois modelos digitais: o MDE da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) da NASA, de 2000; e o MDE proveniente das imagens do satélite ALOS PALSAR, lançado pela Agência de Exploração Aeroespacial Japonesa (JAXA).

A missão SRTM foi a pioneira no mapeamento de relevos da área continental do mundo, abrangendo em sua cobertura 80% das áreas emersas do planeta (GROHMANN; RICCOMINI; STEINER, 2008). Por possuir uma grande área de cobertura, os dados SRTM são um dos mais conhecidos e utilizados em análises digitais (DE MACÊDO; SURYA, 2018).

Os dados obtidos por essa missão foram com resolução de 30 m, porém a única região que possuía dados com essa resolução era a área dos Estados Unidos. Para o restante do mundo, ocorreu a reamostragem dos dados para uma resolução de 90 m (RODRIGUES *et al*, 2011).

Contudo, a partir de 2014, os dados com resolução de 30 m foram disponibilizados para toda a área coberta pela missão (ESRI, 2014). Neste trabalho, o MDE utilizado foi o com resolução de 30 m.

O ALOS PALSAR é um tipo de Satélite Avançado de Observação Terrestre-1 (ALOS), com um radar de abertura sintética (PALSAR), que opera com resoluções espaciais que variam entre 10 a 100 metros, e foi objeto de uma missão da JAXA durante o período de 2006 a 2011 (ASF, 2020).

A objetivo dessa missão foi contribuir com os campos de mapeamento, observação precisa da cobertura territorial regional, monitoramento de desastres e levantamento de recursos (ASF, 2020). O modelo digital de elevação utilizado neste trabalho, obtido a partir de imagens de 2011 do ALOS PALSAR, possui resolução espacial de 12,5 metros.

O intuito de se utilizar dois MDEs com resoluções espaciais diferentes foi o de comparar os resultados gerados a partir de cada modelo com dados históricos afim de se determinar qual melhor se aproximou da realidade dos fatos.

É importante salientar que as utilizações de modelos digitais de elevação para a determinação de redes de drenagem podem trazer resultados diferentes quando comparados aos resultados gerados por modelos diferentes.

Essas diferenças são devido as distorções geradas durante a determinação da rede de drenagem. Segundo Sousa (2016) essas distorções surgem devido a diversos fatores, como por exemplo, a reprojeção do sistema de coordenadas de geográficas para planas, a resolução do MDE e também a topografia real da região estudada.

#### 4.2.3 Determinação da sub-bacia de estudo

Os modelos digitais de elevação utilizados abrangem uma área superior a qual busca-se estudar. Com o intuito de reduzir o tempo de processamento das imagens e também facilitar a definição do limiar de drenagem procurado, foi necessário realizar o recorte dos MDEs.

A área de corte utilizada é referente a porção da bacia do Rio do Peixe onde se encontra a área de estudo. Para a delimitação dessa sub-bacia foram utilizados arquivos *shapefiles*, disponibilizados pela Agência Executiva de Gestão das Águas (AESAs), da delimitação física e dos canais principais da bacia hidrográfica do Rio do Peixe.

Utilizando as ferramentas de delimitação de bacias hidrográficas do menu *Hydrological Tools* do Terrahidro foi realizado o seguinte procedimento (passos):

- i. Recorte do MDE a partir do arquivo *shapefile* da delimitação física da bacia hidrográfica do Rio do Peixe;
- ii. *Flow Extraction*: correção do MDE e criação da matriz de direção de fluxo de drenagem (LDD) a partir do MDE coerente;
- iii. *Contributing Area*: extração da matriz de área acumulada, tendo como dado de entrada a matriz LDD;
- iv. *Drainage Extraction*: determinação da matriz de rede de drenagem a partir da matriz de área acumulada e adotando-se um valor para o limiar de drenagem;

Na determinação dessa matriz, teve-se como base para a definição do limiar de drenagem o *shapefile* da rede de drenagem principal a bacia hidrográfica do Rio do Peixe;

- v. *Segments*: divisão da matriz de rede de drenagem em segmentos de acordo com a área de contribuição;
- vi. *Mini Basins*: determinação de todas as “sub-bacias hidrográficas” originadas a partir de cada segmento criado da matriz da rede de drenagem;
- vii. *Create batch points*: definição do exutório da “sub-bacia hidrográfica” procurada;

Nesta etapa adotou-se como exutório um ponto na rede de drenagem (gerada pelos passos ii, iii e iv), próximo à área estudada, localizado no canal de maior ordem.

- viii. *Watershed Delineation*: delimitação da “sub-bacia hidrográfica” a partir do exutório adotado;
- ix. *Vector Watersheds*: vetorização da “sub-bacia hidrográfica”;
- x. Recorte do MDE a partir da camada vetor da “sub-bacia hidrográfica” definida;

#### 4.2.4 Processamento e obtenção da mancha de inundação do Rio do Peixe

Para a obtenção das áreas inundáveis da cidade de São João do Rio do Peixe foi realizado novamente os passos ii, iii e iv sendo os dados de entrada os MDEs resultados do item 8.2.

É importante destacar que a repetição desses três passos iniciais foi necessária pois as matrizes geradas no item anterior possuem tamanhos divergentes da matriz dos MDEs recortados. Isso impossibilita a aplicação da metodologia de obtenção do modelo HAND.

No passo iv, é importante frisar que o valor do limiar de drenagem varia de acordo a resolução do MDE, visto que ele é caracterizado como sendo um valor da matriz de área de contribuição, que será adotado como sendo o ponto mínimo da rede de drenagem a ser gerada.

Por esse motivo, no processo de definição da matriz HAND a determinação do limiar de drenagem é feita por tentativa e erro, buscando adequar o limiar de drenagem ao valor que melhor caracteriza a rede de drenagem da área estudada.

Em sequência, foi utilizada a ferramenta HAND, também presente no menu *Hydrological Tools* do Terrahidro, que tem como intuito a obtenção do canal de drenagem normalizado (matriz HAND), sendo utilizados como dados de entrada, o MDE da área de estudo, a matriz LDD, e a matriz de rede de drenagem, respectivamente.

Por fim, foi feito o fatiamento do *raster* (menu editar legenda do tema HAND gerado). Nessa etapa final ocorre a definição da altura máxima da lâmina de água alcançada pelo rio por meio de dados históricos, e adoção de uma quantidade de intervalos (fatias) de classificação entre o valor mínimo e máximo.

Após a geração dos dois modelos HAND, referente aos dois modelos digitais adotados, utilizou-se o *software Quantum GIS (QGis)*, para a elaboração do mapa de áreas propensas a risco de desastres por inundação da cidade de São João do Rio do Peixe.

#### 4.2.5 Validação das informações geradas

Para a validação das manchas de inundações obtidas e também para a obtenção de informações sobre as lâminas máximas alcançadas pelo Rio do Peixe,

foi utilizada como fonte bibliográfica o trabalho "A Problemática Sócioambiental na Cidade de São João Do Rio Do Peixe – PB", de Pereira (2009), onde a autora relata informações sobre a última inundação que ocorreu na cidade de São João do Rio Do Peixe, em 2009 (Figura 9).

**Figura 9 – Bairro da região sul da cidade de São João do Rio do Peixe durante a inundação de 2009**



Fonte: Pereira (2009).

Além disso, a partir dos registros de Pereira (2009), foi realizada uma pesquisa de campo, onde foram visitados os locais da cidade que foram detectados como pontos corriqueiros de inundações, para coletar informações sobre o nível de água durante esses eventos.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 OBTENÇÃO DAS SUB-BACIAS**

Para cada MDE utilizado foi realizada a obtenção de dois modelos de análise: um a partir da divisão da rede real de drenagem do Rio do Peixe em “sub-bacias hidrográficas” de menor extensão; e outro obtido a partir da determinação de um ponto considerado como exutório do Rio do Peixe, próximo da cidade, criando-se uma bacia única de maior extensão que o primeiro modelo.

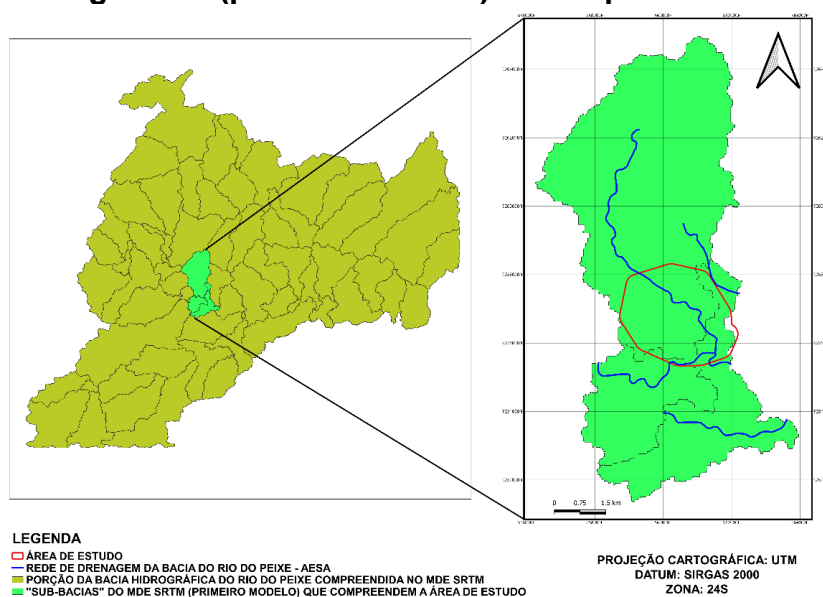
Essa análise foi adotada, pois, durante o desenvolvimento do trabalho, percebeu-se que ao considerar apenas a parte do MDE referente à porção da área de estudo, a área de contribuição do canal do Rio do Peixe, que é o canal principal, se tornava menor que a área de contribuição do Riacho Olho D'água (canal secundário). Essa incoerência se dá devido ao Rio do Peixe estar localizado na periferia do perímetro urbano, enquanto o Riacho Olho D'água corta uma porção da cidade.

Para a obtenção do primeiro modelo, foi adotado um limiar de drenagem que se aproximasse da rede de drenagem disponibilizada pela AESA, onde seguindo os passos i a vi (item 8.2), foram determinadas “sub-bacias hidrográficas” da bacia hidrográfica do Rio do Peixe.

Nessa etapa, o limiar de drenagem adotado para o MDE SRTM foi de 31.712 pixels (28,54 km<sup>2</sup>), e para o MDE ALOS PALSAR foi igual a 140.000 pixels (21,88 km<sup>2</sup>). Essa disparidade entre os valores dos limiares é, principalmente, devido à diferença de resolução dos dois modelos.

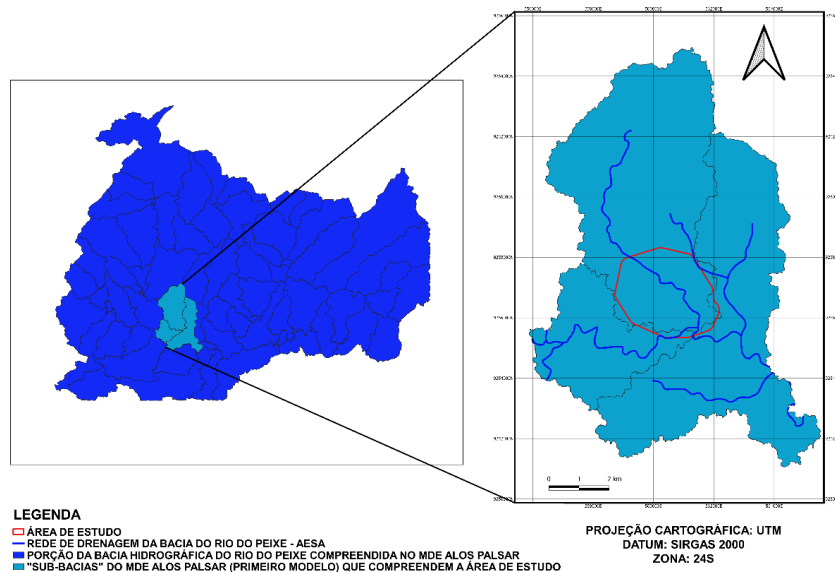
Por essa análise, percebeu-se que para o MDE SRTM, a mancha urbana do município de São João do Rio do Peixe está inserida em três sub-bacias hidrográficas, enquanto que para o MDE ALOS PALSAR, a cidade está localizada em apenas uma. Essa variação se deu devido às disparidades nas extensões das redes de drenagem adotadas, que acabam causando diferença na delimitação das bacias hidrográficas (Figuras 10 e 11).

**Figura 10 – Localização da cidade de São João do Rio do Peixe na “sub-bacia hidrográfica” (primeiro modelo) obtida pelo MDE SRTM**



Fonte: elaborada pela autora.

**Figura 11 – Localização da cidade de São João do Rio do Peixe na “sub-bacia hidrográfica” (primeiro modelo) obtida pelo MDE ALOS PALSAR**



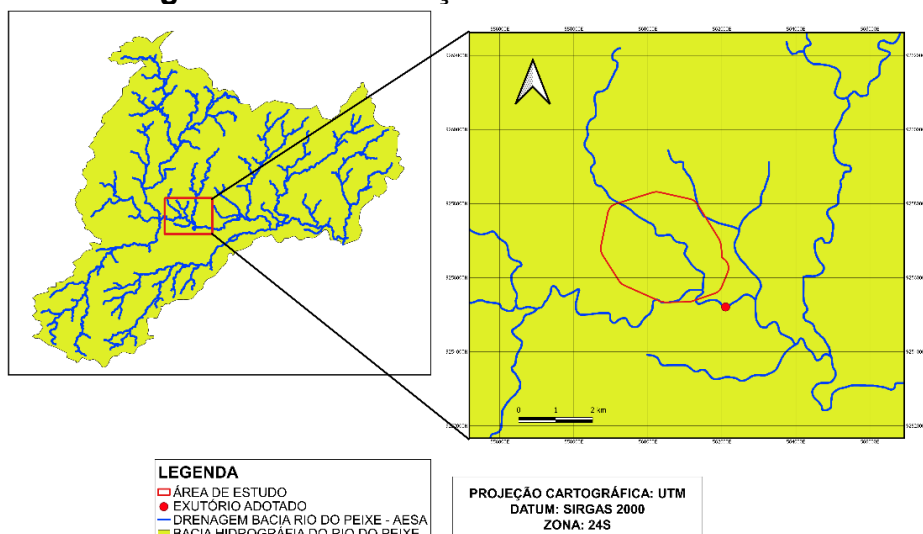
Fonte: elaborada pela autora.

Para o MDE ALOS PALSAR, apesar de a mancha urbana estar inserida em apenas uma “sub-bacia hidrográfica”, optou-se por considerar a região de três “sub-bacias hidrográficas”, com o intuito de considerar uma maior extensão do Rio do Peixe.

Além disso, ao considerar apenas uma porção da bacia hidrográfica do Rio do Peixe, existe a possibilidade de surgir distorções na real rede drenagem devido às regiões nas bordas do MDE cortado, que podem gerar um escoamento para o canal final de drenagem por trajetórias que não condizem com a realidade (JUSTINO, 2019). Por isso, ao considerar uma extensão maior que a que se busca avaliar, percebeu-se que o resultado possuiu uma melhor aproximação da rede real de drenagem.

Para a definição das “sub-bacias hidrográficas” do segundo modelo (Figura 12) foram utilizados os passos vii e viii (item 8.2), onde para os dois MDEs, o ponto adotado como exutório o mesmo, tendo-se como base para sua definição o *shape* da rede de drenagem disponibilizada pela AESA.

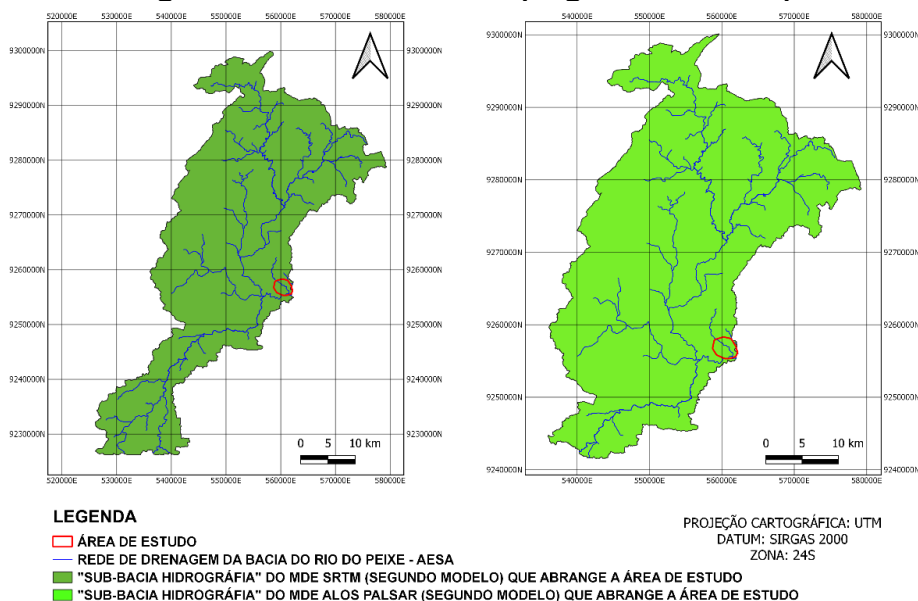
**Figura 12 – Localização do exutório adotado**



Fonte: elaborada pela autora.

A extensão das “sub-bacias hidrográficas” originárias do segundo modelo (Figura 13) é relativamente maior que a extensão das resultantes do primeiro modelo. Essa diferença é resultado do procedimento adotado pelo *software* Terrahidro, pois, ao utilizar a ferramenta *Mini Basis* (primeiro modelo), ele considera diversos pontos do canal de drenagem como sendo exutórios de bacias hidrográficas menores. Enquanto que ao utilizar as ferramentas *Create batch points* e *Watershed Delineation* (segundo modelo), ele adota como uma única bacia hidrográfica toda a área de contribuição acima do ponto considerado exutório.

**Figura 13 – “Sub-bacias” (segundo modelo)**



Fonte: elaborada pela autora.



## 5.2 OBTENÇÃO DO MODELO HAND

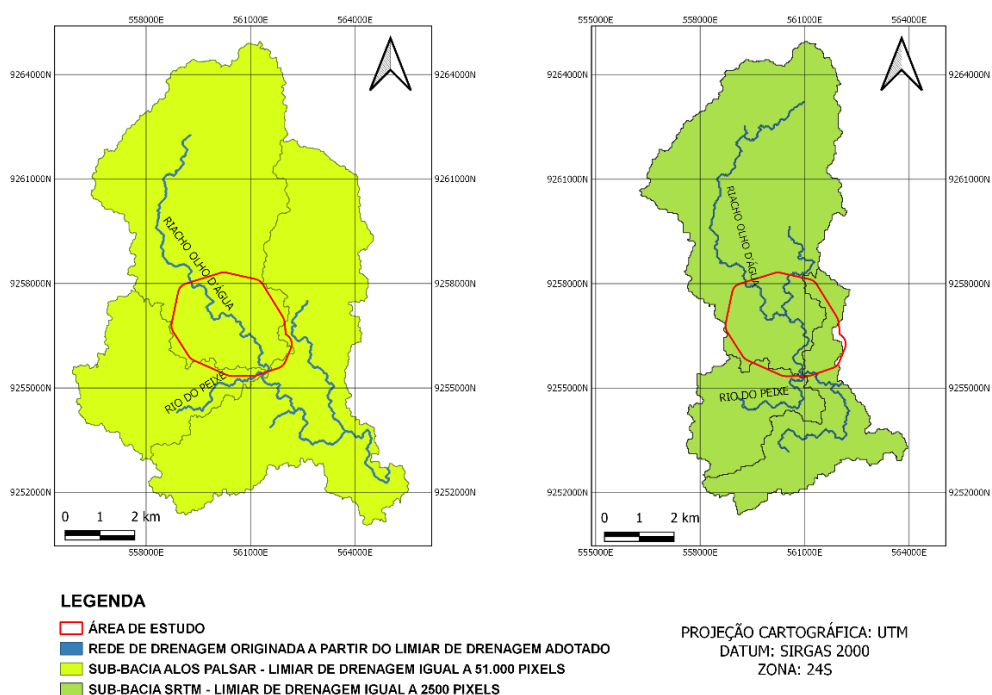
A partir da delimitação das “sub-bacias hidrográficas”, foi realizado o recorte dos modelos digitais de elevação (MDEs) para cada área considerada. Utilizando os MDEs citados, foi possível determinar a matriz de direção de fluxo de drenagem (LDD) e a matriz de área acumulada para ambos. Esses dois parâmetros são necessários para a definição do limiar de drenagem.

Como dito anteriormente, o valor do limiar de drenagem depende da resolução do MDE e também da extensão da rede de drenagem que busca analisar.

A definição do limiar de drenagem para este trabalho foi feita a partir da análise de qual valor representaria melhor a rede de drenagem que se estende apenas pela mancha urbana da cidade, levando em consideração qual o limiar gerava um modelo HAND que abrangia os pontos visitados em campo.

Os limiares (Figura 14) adotados para as “sub-bacias hidrográficas” do primeiro modelo foram iguais a 2.500 pixels (2,25 km<sup>2</sup>) para o MDE SRTM, e 51.000 pixels (7,97 km<sup>2</sup>) para o MDE ALOS PALSAR. Percebe-se uma grande diferença na área de contribuição dos dois modelos, e consequentemente, na extensão da rede de drenagem gerada.

**Figura 14 – Redes de drenagem obtidas a partir dos limiares de drenagem adotados (modelo um)**



Fonte: elaborada pela autora.

O motivo para essa disparidade é devido ao formato da “sub-bacia hidrográfica” do MDE SRTM. Percebeu-se que valores muito altos de limiar resultava na desconsideração do leito principal do Rio do Peixe como parte da rede de drenagem da área.

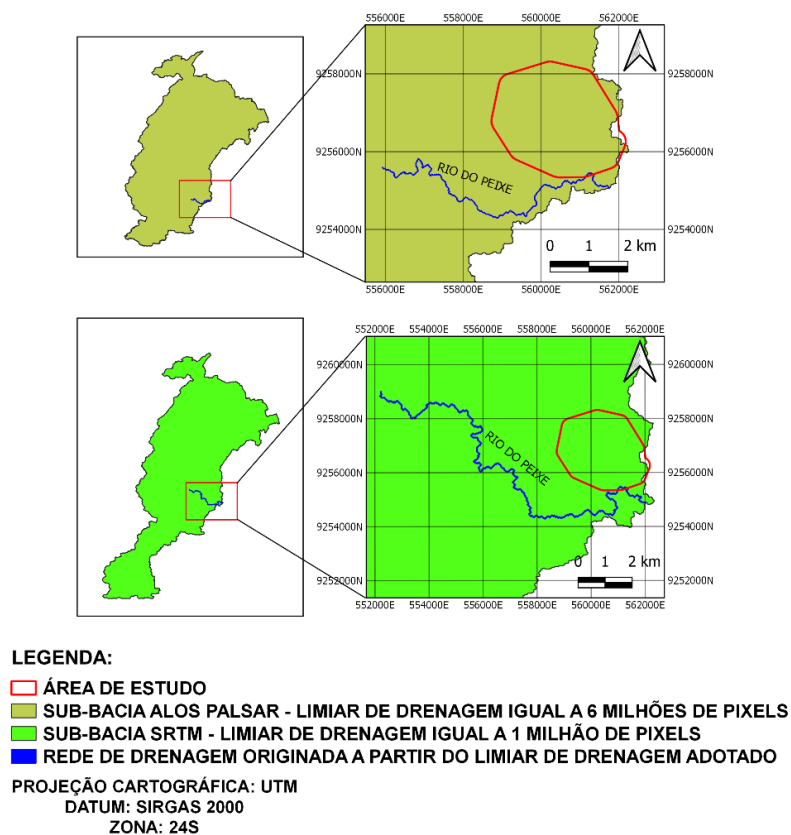
Para as “sub-bacias hidrográficas” do segundo modelo, devido à grande extensão da área de influência dessas, os valores dos limiares de drenagem (Figura 15) considerados foram bastante elevados em comparação aos limiares das “sub-bacias hidrográficas” do primeiro modelo.

Essas diferenças se deram principalmente pela grande diferença na área de contribuição das áreas das “sub-bacias”, que influencia diretamente na definição do limiar de drenagem e conseqüentemente na rede de drenagem final.

No primeiro modelo, foi possível se determinar um valor para o limiar de drenagem que resultasse em uma rede de drenagem que compreendia tanto o Rio do Peixe como o Riacho Olho D’água.

Entretanto, para as “sub-bacias” do segundo modelo, devido à grande área de contribuição, a adoção de um limiar de drenagem que compreendesse os dois cursos d’águas resultava na adição de pontos à rede de drenagem que não fazem parte da rede de drenagem real da área estudada. Por esse motivo, optou-se pela adoção de limiares que resultassem em canais de drenagens que compreendessem apenas o Rio do Peixe (rio principal).

**Figura 15 – Redes de drenagem obtidas a partir dos limiares de drenagem adotados (modelo dois)**



Fonte: elaborada pela autora.

Para o MDE SRTM, o limiar foi de 1 milhão de pixels (900 km<sup>2</sup>), e para o MDE ALOS PALSAR, foi igual a 6 milhões de pixels (937,5 km<sup>2</sup>). Porém, nota-se uma maior semelhança entre a área considerada como parte da rede de drenagem.

Ao analisar as matrizes de rede de drenagem geradas, percebe-se uma distorção entre os dois modelos. No trabalho em questão, foi analisado que as mais prováveis causas para as distorções nos dois resultados seria a diferença de resolução entre os dois modelos digitais utilizados.

A partir das matrizes de rede de drenagem geradas, foram determinados os modelos HAND para as quatro “sub-bacias hidrográficas”, que são o MDE normalizado em relação ao canal de drenagem considerado em cada caso.

Com base nos modelos HAND obtidos, foi realizado o recorte da área que compreende a cidade de São João do Rio do Peixe, com o intuito de analisar quais regiões da cidade estão em áreas com populações consideradas suscetíveis às inundações.

Para essa análise ser possível, foi feito o fatiamento do HAND adotando-se uma escala de risco baseada nas lâminas de água alcançada em inundações passadas. Essas lâminas foram obtidas a partir dos relatos obtidos, por meio de conversas informais com moradores das regiões afetadas, onde em comparação com a topografia do local, foi possível realizar uma estimativa dos níveis alcançados nas inundações passadas (Figura 16).

**Figura 16 – Pontos visitados na pesquisa de campo assinalados em amarelo**



Fonte: elaborada pela autora com auxílio do software *Google Earth*.

Por meio dessa comparação foi constatado que na inundação de 1985, onde segundo os relatos dos moradores foi a maior inundação ocorrida na cidade, a máxima lâmina alcançada pelo Rio do Peixe foi de dois metros acima do seu nível normal.

O ponto considerado nessa estimativa foi o ponto P2 (Figura 15), que está localizado nas margens do leito principal do Rio do Peixe, e pela análise da topografia da região, está a aproximadamente 2 metros de altura do curso do rio. Nesse local, foi relatado que na inundação de 1985, a lâmina de água chegou ao nível da residência, fato que nunca tinha acontecido (Figura 17).

**Figura 17 – Localização do ponto de referência para a definição da escala de risco a inundações**



Fonte: elaborada pela autora.

Pelo fatiamento da mancha HAND obtida, o risco de desastres por inundações foi classificado em:

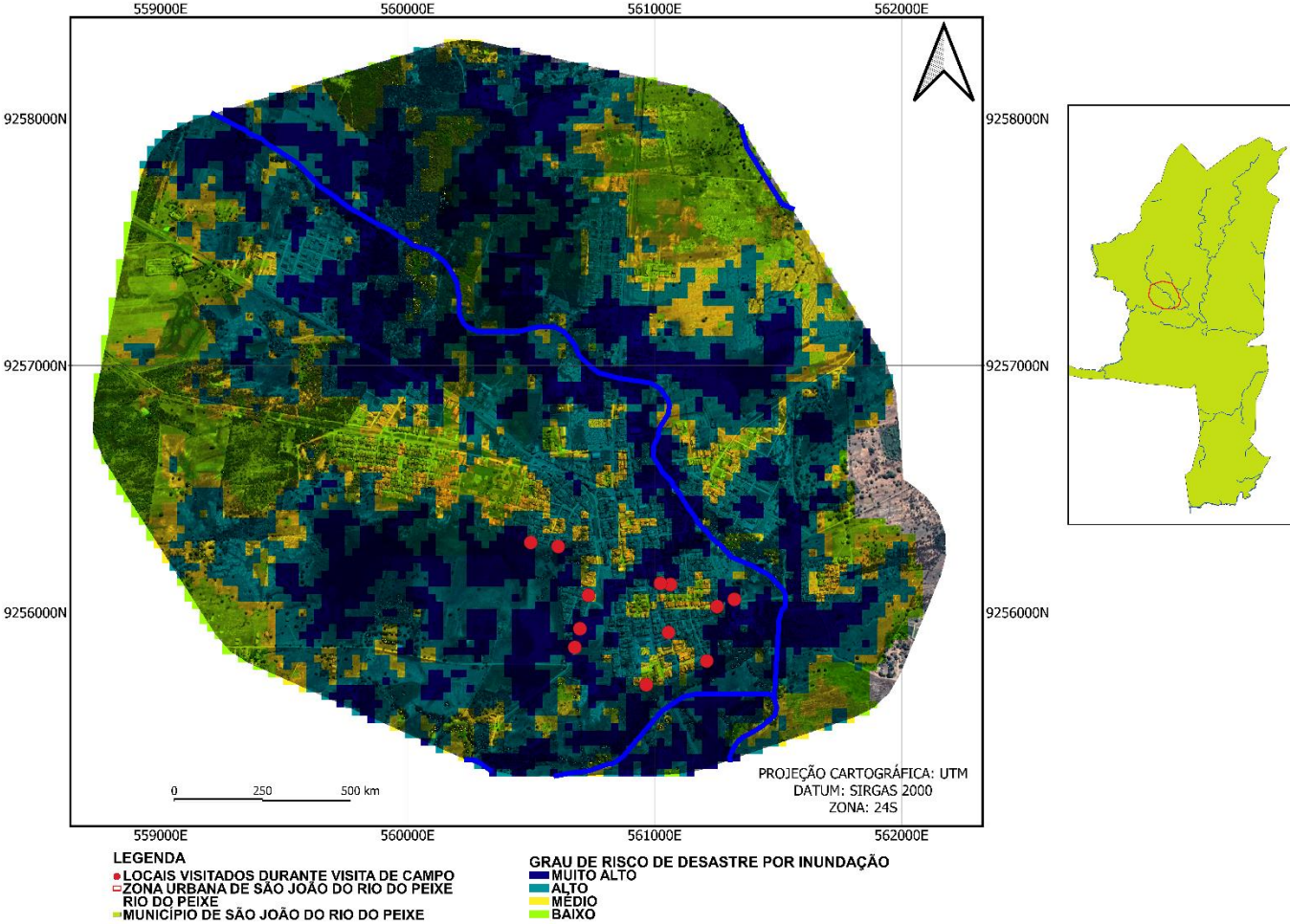
- Nível muito alto: áreas com cota 0 em relação ao canal de drenagem;
- Nível alto: áreas com cota entre 1 e 2 m em relação ao canal de drenagem;
- Nível médio: áreas com cota entre 2 e 3 m em relação ao canal de drenagem;
- Nível baixo: áreas com cotas superiores a 3 m.

Para a utilização da escala de risco adotada, os modelos HAND gerados a partir dos quatro modelos de “sub-bacias hidrográficas” considerados, foram cortados para delimitar apenas a área referente à cidade de São João do Rio do Peixe.

Com isso, utilizando os quatro modelos HAND obtidos para a área de estudo, e com o auxílio de imagens do *Google Earth*, foram gerados mapas que apresentam o nível de risco a desastres por inundações em todo o perímetro urbano (Figuras 18, 19, 20 e 21).

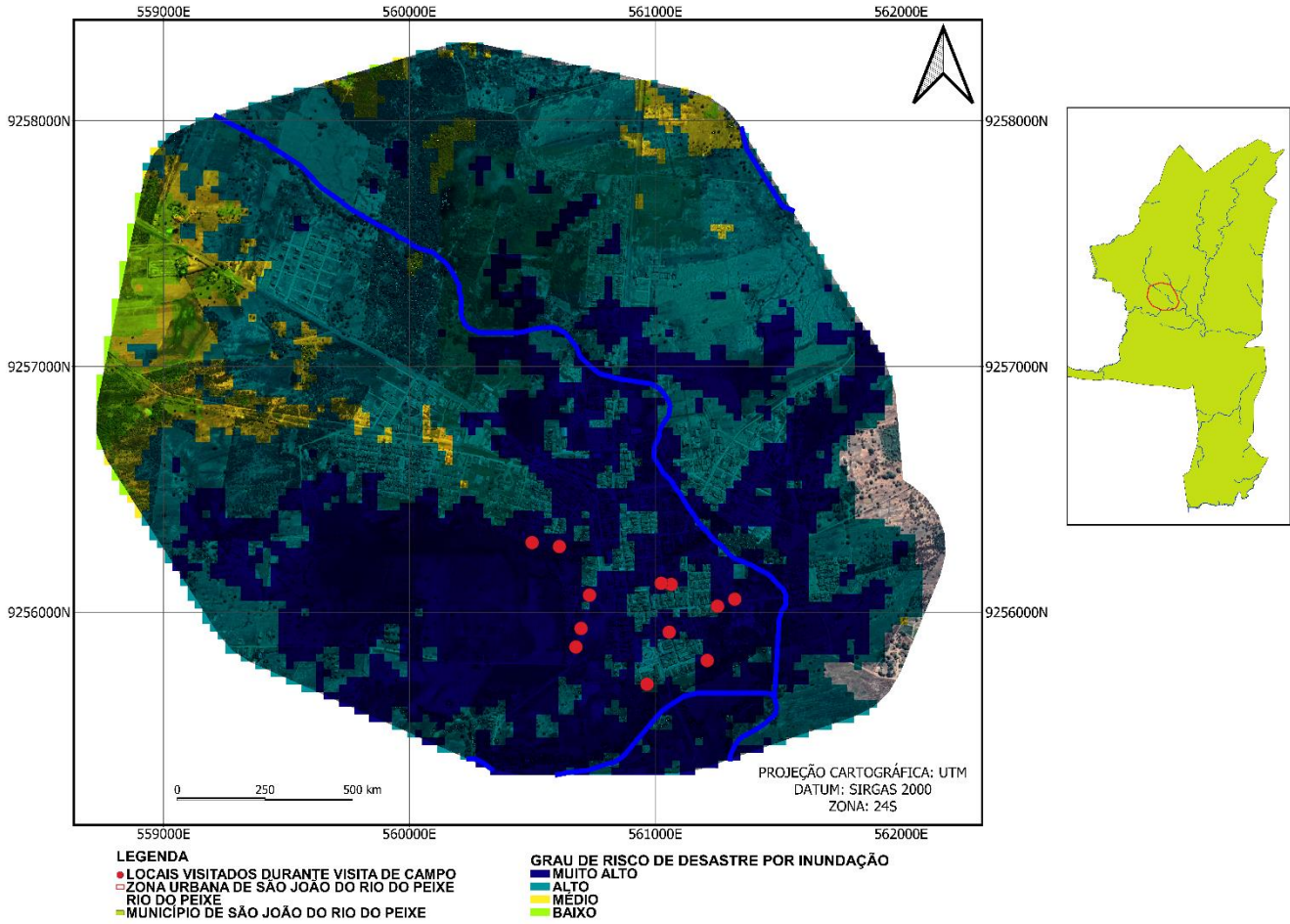


**Figura 18 – Mapa de risco de desastre por inundação da cidade de São João do Rio do Peixe obtido a partir do modelo HAND originado do MDE SRTM com limiar de drenagem de 2500 pixels**



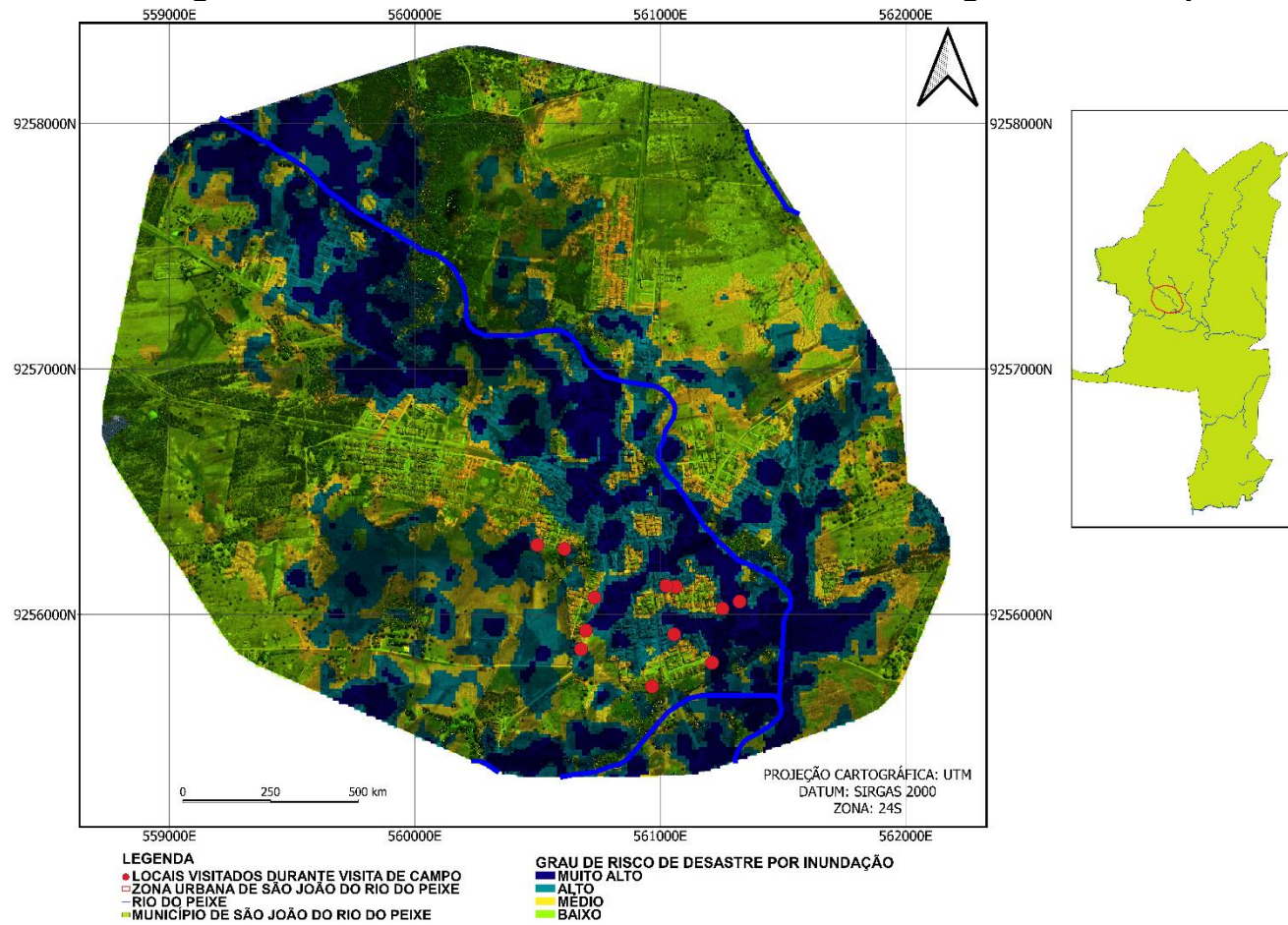
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 19 – Mapa de risco de desastre por inundação da cidade de São João do Rio do Peixe obtido a partir do modelo HAND originado do MDE SRTM com limiar de drenagem de 1 milhão de pixels



Fonte: elaborada pela autora.

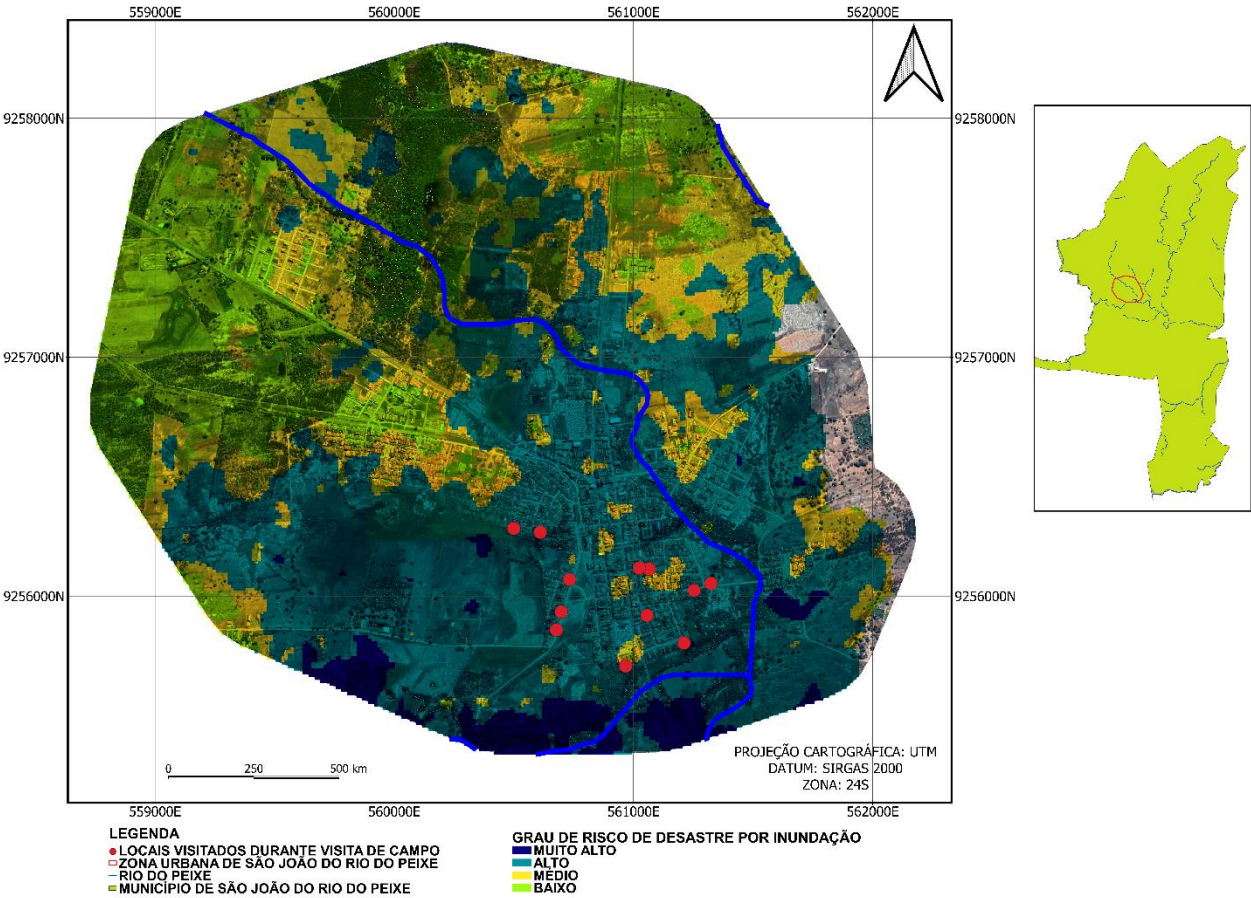
**Figura 20 – Mapa de risco de desastre por inundação da cidade de São João do Rio do Peixe obtido a partir do modelo HAND originado do MDE ALOS PALSAR com limiar de drenagem de 51.000 pixels**



Fonte: elaborada pela autora.



**Figura 21 – Mapa de risco de desastre por inundação da cidade de São João do Rio do Peixe obtido a partir do modelo HAND originado do MDE ALOS PALSAR com limiar de drenagem de 6 milhões de pixels**



Fonte: elaborada pela autora.

### 5.2.1 Análise dos resultados obtidos

Realizando uma análise comparativa entre os modelos HAND obtidos, nota-se como o grau de suscetibilidade da área de estudo variou de um modelo para o outro.

Isso mostra como o valor do limiar de drenagem escolhido tem grande influência no resultado final do modelo HAND. Pois, quanto mais próximo consegue se aproximar da rede real de drenagem da região, mais representativo será o modelo final obtido.

Além disso, foi possível notar como a adoção dos dois tipos de modelos de “sub-bacias hidrográficas” também teve impacto nos modelos HAND gerados.

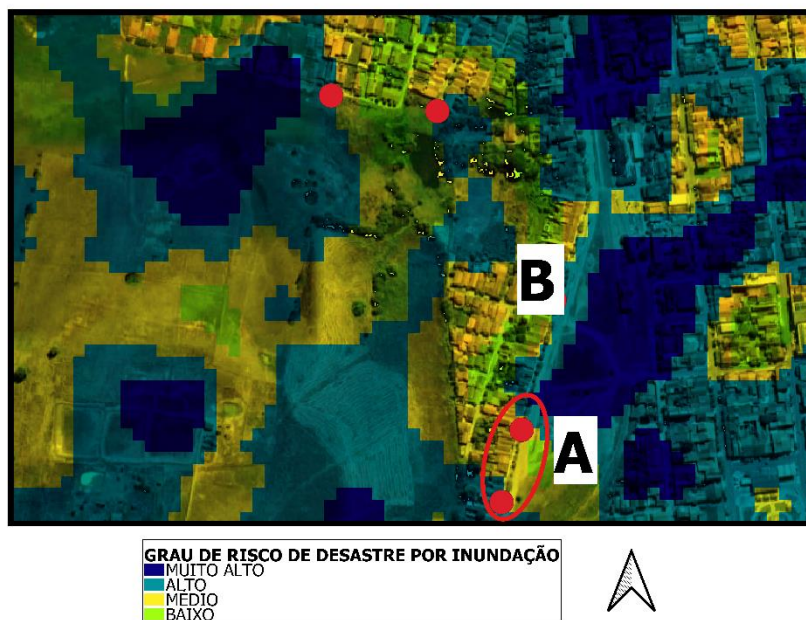
Pois, ao comparar os quatro modelos obtidos, foi possível perceber como a adoção de “sub-bacias” com extensões menores (primeiro modelo) resultou em modelos HAND com manchas de inundações com uma maior variabilidade de grau de suscetibilidade a risco por inundações pela área estudada. Enquanto que os modelos HAND gerados a partir das “sub-bacias” de maiores extensões (segundo modelo) tiveram uma menor variabilidade nos valores do grau de suscetibilidade, apresentando manchas mais contínuas.

Em relação às resoluções dos MDEs utilizados, nota-se que os modelos HAND gerados obtiveram resultados distintos em relação à extensão das manchas de inundações. Porém, percebe-se que apesar dessas disparidades, grande parte das áreas consideradas de alto risco (nível de 0 a 2 m) se mantiveram nesse intervalo nos quatro modelos gerados.

Com o auxílio do Google Earth, e a partir das informações obtidas em Pereira (2009) e dos relatos dos moradores da região, foi possível analisar qual dos modelos gerados é o mais representativo para a cidade de São João do Rio do Peixe.

O modelo menos representativo da área de estudo foi o modelo ALOS PALSAR DE 51 MIL PIXELS, visto que dentre os 12 pontos visitados (Figura 16), dez foram considerados na faixa de médio e baixo risco, incluindo os cinco pontos localizados na região do bairro da Estação (Figuras 22, 23 e 24).

**Figura 22 – Pontos de inundação subestimados no HAND MDE ALOS PALSAR de 51 mil pixels - bairro da Estação: (A) vista de um ponto periférico e (B) vista de um ponto no interior**



Fonte: elaborada pela autora.

**Figura 23 – Região do bairro da Estação (ponto A) da figura 19) subestimada no HAND ALOS PALSAR de 51 mil pixels**



Fonte: Pereira (2009).

**Figura 24 – Região do bairro da Estação (ponto B) da figura 19) subestimada no HAND ALOS PALSAR de 51 mil pixels**



Fonte: Pereira (2009).

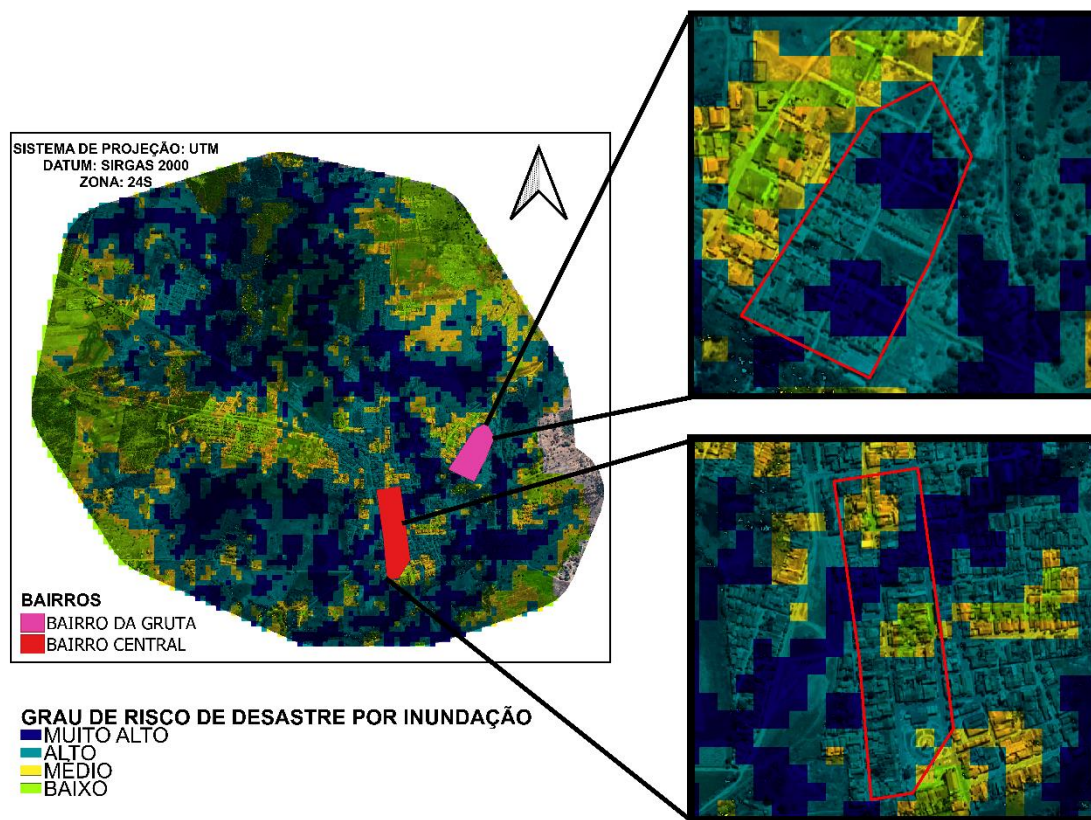
Segundo os relatos dos moradores desse bairro, o bairro da Estação é um dos pontos mais críticos da cidade, onde há registros de inundações em toda a região que compreende o bairro, com históricos de desastres relacionados às altas lâminas de água que resultaram em realocação provisória da população e perdas de bens materiais.

Em relação ao modelo mais representativo da área de estudo, constatou-se que o modelo HAND SRTM DE 2500 PIXELS foi o mais aproximado ao comparar com as informações dos pontos visitados e também dos registros de Pereira (2009), e por isso, ele foi considerado o mapa de risco da região estudada.

Apesar disso, esse modelo também apresentou algumas regiões com de superestimação da mancha (Figura 25), como é o caso da região Sul da cidade, onde se localiza o bairro Central e da região Leste, onde se localiza o bairro da Gruta.



**Figura 25 – Regiões da área de estudo cujo grau de risco foi superestimado no modelo HAND SRTM de 2500 pixels**



Fonte: elaborada pela autora.

No bairro Central, de acordo com os moradores das residências situadas próximas à margem do Rio do Peixe, mesmo nas maiores inundações registradas, o nível do rio não chega a invadir as edificações nessa região. E também não atinge ao perímetro próximo à praça Matriz, o que pode ser constatado como uma área de baixo risco a inundação.

No bairro da Gruta, de acordo com Pereira (2009), apenas a região Leste é propícia a inundações. Entretanto, as águas não chegam a inundar a região que compreende as edificações do local, onde pode ser considerado como médio ou baixo risco.

### 5.3 ANÁLISE DO RISCO A PARTIR DO MODELO HAND ADOTADO E POSSÍVEIS SOLUÇÕES PARA SUA REDUÇÃO

A partir do modelo HAND SRTM DE 2500 PIXELS, que foi o considerado como o mais representativo da área de estudo, foi possível perceber como a cidade de São

João do Rio do Peixe está suscetível ao risco de desastres por inundação devido a uma grande porção da cidade ser considerada de alto risco.

Por este motivo, percebe-se que a área de estudo é bastante suscetível aos problemas gerados devido aos eventos de inundações que podem ocorrer. Além disso, esses problemas também podem ser agravados por meio da ocupação indevida de áreas propensas ao risco, que ocorre naturalmente devido ao crescimento urbano do município e também devido ao desconhecimento sobre a problemática.

Pela comparação entre o modelo HAND gerado e as imagens do *Google Earth*, percebeu-se que algumas edificações de órgãos públicos e de prestadores de serviço estão localizadas em áreas consideradas de alto risco a desastres por inundação. Alguns exemplos são as sedes da Agência de Correios, da Cadeia Pública, da Feira Livre, e da Casa de Saúde Nossa Senhora de Fátima, esta não mais em funcionamento atualmente. A ocorrência de inundações nessas regiões resulta em transtornos para toda a população da cidade.

Além disso, uma outra área considerada de alto risco é a região Norte da cidade, onde está localizado o cemitério. Segundo os relatos de moradores, na ocorrência de inundações nessa área da cidade, as águas chegam a invadir o cemitério, inundando uma porção dos túmulos existentes, o que pode acarretar em problemas ligados à saúde da população residente próxima à área e até mesmo a contaminação do lençol freático em grandes extensões.

Por meio das considerações feitas, percebe-se a necessidade de medidas a serem tomadas afim de reduzir o risco de desastres por inundação da população da cidade.

Para tanto, é necessário a criação de medidas preventivas por meio do Poder Público que visem controlar o crescimento da cidade próximas às áreas consideradas de alto risco. Uma forma de realizar esse controle é por meio do mapeamento dessas áreas e da criação de planos que tragam diretrizes sobre quais áreas não devem ser ocupadas e medidas com o intuito de reduzir a degradação de áreas próximas ao leito do Rio do Peixe.

Além disso, é necessário adotar medidas estruturais com o intuito de diminuir o surgimento de novos riscos devido aos eventos de inundações, atrelados aos problemas de infraestrutura da cidade, como por exemplo, os problemas ligados a esgotamento sanitário e drenagem urbana, que geralmente acabam maximizando o impacto das inundações por meio da proliferação de vetores e doenças infecciosas.

Além das medidas estruturais, é preciso pensar em medidas que busquem diminuir o impacto de eventos futuros nas áreas já ocupadas. Por isso, o Poder Público Municipal deve ter conhecimento dos possíveis riscos existentes, entender os conceitos de risco de desastres, no tocante as ameaças e vulnerabilidades, e assim elaborar planos para a redução de risco de desastres (RRD), como por exemplo, a implantação de sistemas de alertas e a criação de pontos de apoio para a população afetada.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Por meio dos resultados obtidos neste trabalho de conclusão de curso foi possível perceber que, apesar de possuir uma frequência relativamente menor em relação aos desastres ligados à seca, os desastres por inundações também possuem grande impacto na cidade de São João do Rio do Peixe.

A utilização do modelo HAND como ferramenta de análise e mapeamento de manchas de inundação se apresentou como sendo uma ferramenta de aplicação acessível, visto que o único dado de entrada necessário foi o modelo digital de elevação (MDE) da área de estudo.

Entretanto, foi constatado que para um resultado satisfatório a partir dessa metodologia é necessário se ter o conhecimento prévio sobre o comportamento da rede de drenagem do objeto de estudo, visto que a calibração da matriz de rede de drenagem é o ponto chave para a obtenção de bons resultados do modelo HAND.

Atrelado a isso, percebeu-se também que a acurácia dos resultados depende da qualidade do MDE utilizado e, principalmente, da adoção do valor de limiar de drenagem. Este parâmetro, quando não bem definido pode acabar gerando a omissão de pontos críticos de áreas de inundações e também a superestimação da mancha de inundação procurada.

Apesar das distorções, o modelo final encontrado foi satisfatório para a realização da análise do risco a desastres por inundação na cidade de São João do Rio Peixe, comprovando como as características geomorfológicas da região possuem grande influência nos impactos causados por eventos de inundações.

Além disso, de acordo com os dados históricos coletados, foi perceptível que a população da cidade é bastante afetada por esse tipo de desastre, principalmente

devido a ocupação de áreas com alto risco de inundações por meio do processo indevido de urbanização para essas áreas.

Como sugestão para trabalhos futuros seria a aplicação da metodologia HAND para a região, utilizando modelos digitais de alta resolução, afim de se analisar qual o impacto da urbanização da cidade na maximização ou minimização do risco a desastres por inundação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. L. P. R. **Aplicação do modelo *Height Above the Nearest Drainage (HAND)* para análise de inundação na bacia hidrográfica do rio Cuiá, João Pessoa, Paraíba, Brasil.** João Pessoa, PB: Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, 2019. 53 p. (Trabalho de Conclusão de Curso).

AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS (AESAs). Precipitação pluviométrica anual (mm), de 1994 a 2019 para o município de São João do Rio do Peixe – PB. Disponível: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas/>>. Acesso em: 12 de abril de 2020.

ALOS PALSAR – About. **ASF**, Estados Unidos, 2020. Disponível em: <<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/alos-palsar-about/>>.

ANDRADE FILHO, Alceu Gomes de; SZÉLIGA, Marcos Rogério; ENOMOTO, Carolina Ferreira. **Estudo de medidas não-estruturais para controle de inundações urbanas.** 2000.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional, Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. Lei Nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm)>. Acesso em: 10 Mar. 2020.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Conselho Deliberativo. **Resolução Nº 107, de 27 de julho de 2017.** Estabelece critérios técnicos e científicos para delimitação do Semiárido Brasileiro e procedimentos para revisão de sua abrangência. Recife, PE: SUDENE, 2017a.

BRASÍLIA. Senado Federal. **Projeto de Lei do Senado PLS 316/2009.** Altera a Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001, denominada Estatuto da Cidade, para incluir critérios de classificação do espaço urbano e rural, e dá outras providências. Disponível em: <<https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/92148>>.



BUARQUE, D. C. **Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 14, n. 2, p. 91-103, 2009.

CANO, Wilson. Urbanização: sua crise e revisão de seu planejamento. **Revista de Economia Política**, v. 9, n. 1, 1989.

CASTRO, Antônio Luiz Coimbra de. **MANUAL DE PLANEJAMENTO EM DEFESA CIVIL VOLUME IV**. 1999.

CUARTAS, Luz Adriana; TOMASELLA, Javier; NOBRE, Antonio Donato; NOBRE, Carlos Afonso Nobre; HODNETT, Martin G.; WATERLOO, Maarten J.; OLIVEIRA, Sylvia Mota de; RANDOW, Rita de Cássia von; TRANCOSO, Ralph; FERREIRA, Mônica. *Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model*. **Journal of Hydrology**, v. 462, p. 15-27, 2012.

ENOMOTO, C. F. **Método para elaboração de mapas de inundação: estudo de caso na bacia do rio Palmital**. Paraná. Dissertação (Mestre em Engenharia de recursos hídricos e ambiental) – Setor de tecnologia. Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2004.

Esri Leverages Federal Open Data Policies. **ESRI**, Estados Unidos, 23 de setembro de 2014. Disponível em: <<https://tecnoblog.net/247956/referencia-site-abnt-artigos/>>. Acesso em: 04 de março de 2020.

FILGUEIRA, H. J. A.; BARBOSA, M. P. **O Nordeste brasileiro: uma região de desastres socialmente construídos**. In: GARCIA, J. P. M. (Org.). Desastres na Paraíba: riscos, vulnerabilidade e resiliência. João Pessoa, PB: Editora Universitária da UFPB, 2013. p. 9-24. ISBN 978.85.237.0590-9.

FILGUEIRA, H. J. A. **Os desastres relacionados com fenômenos naturais no contexto dos sistemas organizacionais**. In: GARCIA, J. P. M. (Org.). Desastres na Paraíba: riscos, vulnerabilidade e resiliência. João Pessoa, PB: Editora Universitária da UFPB, 2013. p. 53-63. ISBN: 978.85.237.0590-9.

FILGUEIRA, H. J. A.; SILVA, T. C. da ; ROSENDO, E. E. Q. . **Estratégias de ação para a redução de risco de desastres por inundação, alagamento e movimento de massa em João Pessoa, Paraíba**. In: CRUZ, D. D. da; MIRANDA, G. E. C. de; SOUZA, B. I. de; LUCENA, R. F. P. de. (Org.). Meio ambiente e desenvolvimento: os desafios da sustentabilidade ambiental. 1ed. João Pessoa, PB: Editora UFPB, 2019, v., p. 157-169.

FONSECA, Lorena de Oliveira. **Urbanização e variação climática na Região Nordeste do Brasil**. 2016.

FREITAS, Carlos Machado de; MIRANDA, Elaine Silva; OSORIO-DE-CASTRO, Claudia Garcia Serpa. **A redução dos riscos de desastres naturais como desafio para a saúde coletiva**. 2014.

GHARARI, S.; HRACHOWITZ, M.; FENICIA, F.; SAVENIJE, H.H.G. *Hydrological landscape classification: investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchment*. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 3275-3291, 2011.

GOERL, Roberto Fabris; KOBAYAMA, Masato. Considerações sobre as inundações no Brasil. **XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2005.

GOERL, Roberto Fabris; KOBAYAMA, Masato; PELLERIN, Joel Robert Georges Marcel. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: estudo de caso do município de Rio Negrinho–SC. **Boletim de Geografia**, v. 30, n. 1, p. 81-100, 2012.

GOERL, Roberto Fabris; MICHEL, Gean Paulo; KOBAYAMA, Masato. Mapeamento de áreas susceptíveis a inundação com o modelo HAND e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais. **Revista brasileira de cartografia**. Vol. 69, n. 1 (2017), p. 61-69, 2017.

GRANJO, Paulo. Quando o conceito de «risco» se torna perigoso. **Análise Social**, n. 181, p. 1167-1179, 2006.

GROHMANN, Carlos Henrique; RICCOMINI, Claudio; DOS SANTOS STEINER, Samar. Aplicações dos modelos de elevação SRTM em geomorfologia. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 2, n. 2, p. 73-83, 2008.

IBGE. **Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias: 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, Coordenação de Geografia, 2017. 82 p. 20021-120 - Rio de Janeiro, RJ - Brasil ISBN 978-85-240-4418-2.

IBGE. **Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais**. Estimativas da população residente com data de referência 1o de julho de 2019. 2019.

INPE, 2019. **Software desenvolvido pelo INPE simula a trajetória da lama no colapso da barragem em Brumadinho/MG**. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/OBT/noticias-obt-inpe/software-desenvolvido-pelo-inpe-simula-a-trajetoria-da-lama-no-colapso-da-barragem-em-brumadinho-mg>>. Acesso em 4 de fevereiro de 2020.

INPE, 2020. TerraHidro. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/projetos/terrahidro>>. Acesso em 15 de março de 2020.

JUSTINO, L. E. L. **Análise da eficiência do dique de Cruz Do Espírito Santo (PB) por meio do modelo HAND**. João Pessoa, PB: Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil, 2019. 61 p. (Trabalho de Conclusão de Curso).

LAVELL, A. 2002. Local Level Risk Management. **Concepts and Experience in Central America**. Paper to be presented at the Disaster Preparedness and Mitigation Summit, New Delhi, India.

DE MACÊDO, Renê Jota Arruda; SURYA, Leandro. COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO DOS SENSORES SRTM E ALOS PALSAR PARA ANÁLISE DIGITAL DE TERRENO. **Revista Contexto Geográfico**, v. 3, n. 6, p. 47-55, 2019.

MARTINE, George; MCGRANAHAN, Gordon. A transição urbana brasileira: trajetória, dificuldades e lições aprendidas. **População e Cidades: subsídios para o planejamento e para as políticas sociais**. Brasília: UNFPA, p. 11-24, 2010.

MEDEIROS, Monalisa Cristina Silva; BARBOSA, Marx Prestes. Vulnerabilidade social, percepções de riscos e desastres: conceitos e abordagens no/do urbano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 01, p. 144-162, 2016.

MENDONÇA, Francisco; LEITÃO, Sanderson Alberto Medeiros. Riscos e vulnerabilidade socioambiental urbana: uma perspectiva a partir dos recursos hídricos. **GeoTextos**, v. 4, 2008.

MILANESI, J.; DE QUADROS, E.L.L; LAHM, R.A. Utilização do modelo HAND no reconhecimento dos terrenos sujeitos a inundação– Porto Alegre/RS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 4, 2017. p. 675-686.

MOMO, Marcos Rodrigo; PINHEIRO, Adilson; SEVERO, Dirceu Luís; CUARTAS, Luz Adriana; NOBRE, Antonio Donato. Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial. **RBRH**, v. 21, n. 1, p. 200-208, 2016.

NOBRE, Carlos A. Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: Região Metropolitana de São Paulo. **Embaixada Reino Unido, Rede Clima e Programa FAPESP em Mudanças Climáticas**, 2010.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; HODNETT, M.; RENNÓ, C. D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M.; SALESKA, S. *Height Above the Nearest Drainage—a hydrologically relevant new terrain model*. **Journal of Hydrology**, v. 404, n. 1-2, p. 13-29, 2011.

NOBRE, Antonio Donato; CUARTAS, Luz Adriana; MOMO, Marcos Rodrigo; SEVERO, Dirceu Luís; PINHEIRO, Adilson; NOBRE, Carlos Afonso. *HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent*. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 2, p. 320-333, 2016.

PARAÍBA. Governo do Estado da Paraíba. Secretaria do Planejamento. **Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (PDRH/PB): Bacia do Rio do Peixe**. João Pessoa, 1996.

PEREIRA, Livia Jordana Assis et al. **A problemática sócioambiental na cidade de São João do Rio do Peixe-PB**. 2009.

PEDRO, Leda Correia; NUNES, João Osvaldo Rodrigues. A Relação entre processos morfodinâmicos e os desastres naturais: uma leitura das áreas vulneráveis a inundações e alagamentos em Presidente Prudente-SP. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 2, n. 34, p. 81-96, 2012.

PIRES, E. G.; BORMA, L. S. Utilização do modelo HAND para o mapeamento de bacias hidrográficas em ambiente de Cerrado. **Anais of 16th Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 5568-5575, 2013.

POZZER, Camila; MAZZEGA, Pierre. A redução de risco de inundação no Brasil: uma prioridade no quadro legislativo do país. **Paranoá**, n. 10, p. 25-36, 2014.

RENNÓ, Camilo Daleles; NOBRE, Antonio Donato; CUARTAS, Luz Adriana; SOARES, João Viane; HODNETT, Martin G.; TOMASELLA, Javier; WATERLOO, Maarten J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3469-3481, 2008.

RODRIGUES, Grasiela de Oliveira; NOBRE, Antonio Donato; SILVEIRA, André Carvalho; CUARTAS, Luz Adriana. Efeitos da resolução espacial de dados SRTM na descrição de terrenos obtida pelo modelo HAND (Height Above the Nearest Drainage) – estudo de caso em Manaus/AM. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO-SBSR**, v. 15, p. 5769, 2011.

SANTOS, Caio Lima dos. IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS: O CASO DA BACIA DO RIO JAGUARIBE, CIDADE DE JOÃO PESSOA/PB. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 2, p. 1025-1033, 2016.

SOUSA, Aloysio Rodrigues de. **Análise das inundações a partir de atributos hidro-climatológicos e ambientais na bacia hidrográfica do Rio Peixe-PB**. 2013.

SOUSA, Thâmara Martins Ismael de et al. Avaliação da qualidade em redes de drenagem processadas a partir de modelos digitais de elevação. 2016.

TUCCI, Carlos EM. Inundações e drenagem urbana. **Inundações urbanas na América do Sul. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, p. 45-141, 2003.

*UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME (UN-HABITAT). Urbanization and development: emerging futures. World cities report 2016*, 2016.

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, CEPED – Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. **Política Nacional de Defesa Civil**. Florianópolis: CEPED-UFSC, 2012.

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, CEPED – Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012: volume Brasil**. Florianópolis: CEPED-UFSC, 2013.

VEYRET, Yvette. Os riscos: o homem como agressor e vítima do meio ambiente.  
In: **Os riscos: o homem como agressor e vítima do meio ambiente**. 2007.