



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

**LUIZ EDUARDO LUCENA JUSTINO**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO DIQUE DE CRUZ DO ESPÍRITO SANTO (PB) POR  
MEIO DO MODELO HAND**

**João Pessoa - PB**

**Maior - 2019**

LUIZ EDUARDO LUCENA JUSTINO

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO DIQUE DE CRUZ DO ESPÍRITO SANTO (PB) POR  
MEIO DO MODELO HAND**

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**

**Maio – 2019**

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

J96a Justino, Luiz Eduardo Lucena.  
Análise da eficiência do dique de Cruz do Espírito Santo (PB) por meio do modelo HAND / Luiz Eduardo Lucena Justino. - João Pessoa, 2019.  
59 f. : il.

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

1. Modelos hidrodinâmicos. 2. Inundações. 3. Riscos de desastres. I. Filgueira, Hamilcar José Almeida. II. Título.

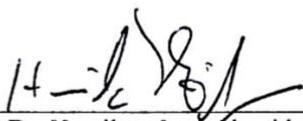
UFPB/BC

## FOLHA DE APROVAÇÃO

LUIZ EDUARDO LUCENA JUSTINO

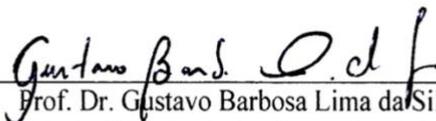
### ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO DIQUE DE CRUZ DO ESPÍRITO SANTO (PB) POR MEIO DO MODELO HAND

Trabalho de Conclusão de Curso em 09/05/2019 perante a seguinte Comissão Julgadora:



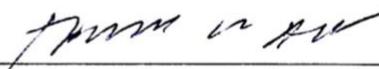
Prof. Dr. Hamilcar José Almeida Filgueira  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



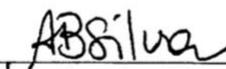
Prof. Dr. Gustavo Barbosa Lima da Silva  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Prof. Dr. Tarciso Cabral da Silva  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Prof.ª Andrea Brasiliano Silva  
Matrícula Siape: 1549557  
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho e a conclusão deste curso à minha mãe, mulher forte e guerreira, que sacrificou seus sonhos pela educação dos seus filhos.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Lucia e Marcos, pelo amor, cuidado e pelas renúncias em prol do meu bem-estar. Obrigado por darem seu melhor, dentro de suas limitações, para que eu pudesse chegar aqui. Esta conquista também é de vocês!

À minha família, pelo incentivo e por compreenderem minhas ausências durante a graduação. Em especial, aos meus irmãos, Wilker e Filipe, pela cumplicidade e apoio.

Ao meu orientador, Hamilcar Filgueira, que além de um grande mestre, é uma pessoa excepcional. Obrigado pela disposição, envolvimento com o trabalho e por todo o conhecimento compartilhado.

Aos que contribuíram diretamente para a realização deste trabalho, em especial ao professor Roberto Fabris Goerl, da UFSC, por rapidamente responder todas as dúvidas que surgiram no decorrer do trabalho. A Jessé Júnior, técnico do Laboratório de Topografia da UFPB, pelo apoio em atividades necessárias à realização desse trabalho. A Maria Luisa Palitot, pela ajuda no desenvolvimento do trabalho.

A todos os professores que um dia já contribuíram para a minha formação ética e acadêmica. Meu reconhecimento e admiração por vocês, mestres, me faz querer seguir seus passos em uma carreira acadêmica.

Aos professores Gustavo Barbosa Lima da Silva e Tarciso Cabral da Silva, por se disponibilizarem gentilmente a participar da banca examinadora deste trabalho.

Aos grandes amigos que ganhei na graduação, em especial Larissa Lima, Diego Amorim, Matheus Vieira, Maria Diciá, Rhoana Zanotelli, Bárbara Dantas, Amanda Lacerda, Matheus Assis, Samuel Lustoza e Beatriz Bessa. Sem vocês essa caminhada teria sido muito mais árdua.

A todos os meus amigos, em especial aos que acompanham a minha trajetória há mais tempo, que são testemunhas de quão importante para mim é a realização desta etapa.

À Universidade Federal da Paraíba, aos órgãos de fomento à pesquisa e aos programas institucionais de apoio ao ensino, pesquisa e extensão, por acreditarem que a educação pública pode ser de qualidade.

A todos os demais, que contribuíram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

## RESUMO

Muitas cidades brasileiras são constantemente afetadas por inundações, principalmente devido à falta de planejamento urbano adequado. Diante disso, os planos de gestão de riscos de inundações aplicam medidas de natureza estrutural, como obras de engenharia, e não-estrutural, como o mapeamento de áreas mais susceptíveis a inundações. Este trabalho tem o objetivo de avaliar a eficiência do dique de Cruz do Espírito Santo, na Paraíba, que foi construído para proteger a cidade de inundações. O núcleo urbano de Cruz do Espírito Santo está localizado nas margens do rio Paraíba e há vários registros históricos de eventos de inundações na cidade ao longo dos últimos séculos. Para atestar a eficiência do dique, utilizaram-se mapas de susceptibilidade a inundações gerados com modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*). Os mapas de inundações foram gerados a partir de Modelos Digitais de Terreno com resolução espacial de 27 centímetros da área de estudo, que inclui o núcleo urbano do município de Cruz do Espírito Santo e um trecho do rio Paraíba. Foram gerados dois Modelos Digitais de Terreno: um que manteve a estrutura do dique e outro que retirou a estrutura do dique através do software de processamento fotogramétrico Agisoft PhotoScan. A partir da comparação dos mapas de inundações gerados para as duas situações, pode-se verificar que o dique teria impedido a inundações ocorrida em 1985, caso já estivesse construído nessa época. Esse estudo aborda uma funcionalidade do modelo HAND até então pouco explorada: a análise da eficiência de estruturas físicas através de mapas de inundações.

Palavras-chave: modelos hidrodinâmicos, inundações, risco de desastres.

## **ABSTRACT**

Many Brazilian cities are constantly affected by floods, mainly due to the lack of proper urban planning. Therefore, flood risk management plans apply structural measures, such as hard engineering structures and non-structural measures, such as mapping of areas that are more susceptible to flooding. The main goal of this work is to evaluate the efficiency of the Cruz do Espírito Santo dike in Paraíba, which was built to protect the city from flooding. The urban core of Cruz do Espírito Santo is located on the banks of the Paraíba River and there are several historical records of flood events in the city over the last few centuries. To assess the efficiency of the dike, flood susceptibility maps were generated using the HAND (Height Above the Nearest Drainage) model. The flood maps were generated from Digital Terrain Models with a spatial resolution of 27 centimetres of the study area, which includes the city of Cruz do Espírito Santo and a section of the Paraíba River. Two Digital Terrain Models were generated: one that maintained the dike structure and another that removed the dike structure through the Agisoft PhotoScan photogrammetric processing software. From the comparison of the flood maps generated for the two situations, it can be concluded that the dike would have protected the city from the flood event occurred in 1985, if it was already built at that time. This study approaches a little explored functionality of the HAND model: the analysis of the efficiency of physical structures through HAND flood maps.

**Keywords:** hydrodynamic models, flooding, disaster risk.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Prejuízos econômicos causados por inundações nas últimas décadas .....	16
Figura 2 – Elevação do nível de um rio, do nível normal até inundação .....	17
Figura 3 – Leito menor e leito maior de inundação.....	18
Figura 4 – Impacto da urbanização desordenada na drenagem .....	19
Figura 5 – Área dos Países Baixos que seria inundada se não houvessem diques .....	21
Figura 6 – Conexão hidrológica entre pontos numa superfície .....	27
Figura 7 – Possíveis direções de fluxo no método D8 .....	27
Figura 8 – Procedimento para gerar a matriz de direção de drenagem local.....	28
Figura 9 – Procedimento para gerar a matriz de área de contribuição .....	28
Figura 10 – Procedimento para gerar a matriz de área acumulada.....	29
Figura 11 – Comparação de MDE e <i>Grid</i> HAND .....	30
Figura 12 – Matriz HAND dividida em classes .....	31
Figura 13 – Mapa HAND para toda a região continental dos Estados Unidos .....	33
Figura 14 – Imagem de satélite da região de Brumadinho, MG, em 29 de janeiro de 2019 ...	33
Figura 15 – Simulação do HAND da mancha de lama da barragem de Brumadinho, MG.....	34
Figura 16 – Delimitação da área de estudo: parte da zona urbana da cidade de Cruz do Espírito Santo, PB .....	36
Figura 17 – Cruz do Espírito Santo e rio Paraíba. ....	37
Figura 18 – VANT DJI <i>Phantom 4 Pro</i> .....	38
Figura 19 – Ortomosaico da área de estudo .....	43
Figura 20 – Modelo Digital de Superfície da área de estudo .....	44
Figura 21 – Modelo Digital de Terreno da área de estudo (com dique).....	44
Figura 22 – Modelo Digital de Terreno da área de estudo (sem dique) .....	45
Figura 23 – Rede de drenagem da área de estudo .....	46

Figura 24 – Sub-bacias do voo 2 .....	47
Figura 25 – Mancha de inundação de HAND (sem o dique) .....	49
Figura 26 – Mancha de inundação de HAND (com o dique).....	50

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Medidas não-estruturais para controle de inundações .....	22
Quadro 2 – Modelos Digitais de Terreno gerados .....	40

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS .....	15
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	15
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	15
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>16</b>
2.1 INUNDAÇÕES.....	16
2.2 MEDIDAS DE COMBATE A INUNDAÇÕES.....	20
2.3 MAPAS DE INUNDAÇÃO .....	23
2.4 MODELOS HIDROLÓGICOS PARA MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES .....	23
2.5 MODELO HAND.....	25
2.5.1 <i>Correção do MDE</i> .....	25
3.5.2 <i>Matriz de direções de drenagem locais</i> .....	26
3.5.3 <i>Matriz de área de contribuição</i> .....	28
3.5.4 <i>Matriz de rede de drenagem</i> .....	29
3.5.5 <i>Matriz HAND</i> .....	30
2.6 APLICAÇÕES DO MODELO HAND .....	31
2.7 UTILIZAÇÃO DE SIGS NO MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES.....	34
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>36</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	36
3.2 OBTENÇÃO DO MDE.....	38
3.2.1 <i>Coleta das imagens</i> .....	38
3.2.2 <i>Processamento das imagens</i> .....	39
3.3 PROCESSAMENTO DOS MAPAS DE INUNDAÇÃO COM O MODELO HAND .....	40
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>43</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>52</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>54</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A maior parte das civilizações humanas se desenvolveu em torno de rios. Isso ocorreu porque os rios podiam ser usados como fonte de água para consumo, vias de transporte e meio para disposição de dejetos. (TUCCI, 2005). Esse fenômeno também fez parte do surgimento de muitas cidades brasileiras. No entanto, devido à falta de planejamento público e crescimento urbano desordenado, áreas como várzeas inundáveis foram ocupadas e urbanizadas. Conseqüentemente, problemas de inundações são frequentes em várias cidades brasileiras, trazendo uma série de prejuízos às comunidades atingidas, incluindo perdas materiais e humanas.

A ocupação inadequada das áreas inundáveis em leito de rios é causada pela ausência ou ineficiência de planos diretores para regulamentar o uso da terra nos municípios. Além disso, inundações ribeirinhas são agravadas em cidades porque a urbanização altera as características geomorfológicas naturais da região, como por meio da impermeabilização do solo. De acordo com o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, as inundações foram responsáveis por cerca de 58,83% das mortes relacionadas a desastres naturais entre os anos de 1991 e 2010 no Brasil. (UFSC, 2012).

Existem dois tipos de medidas utilizadas no controle do risco de desastres por inundações: estruturais e não-estruturais. Para combater as inundações e seus efeitos, as medidas estruturais utilizam obras de engenharia, como diques e barragens, e as medidas não-estruturais usam ferramentas de gestão e planejamento, como mapeamento de áreas mais susceptíveis a inundações. Ambos os tipos de medidas são complementares e devem ser considerados em qualquer plano de controle de risco de inundações.

O mapeamento de áreas susceptíveis a inundações é uma medida não-estrutural amplamente utilizada pelas entidades públicas, permitindo que a população possa reagir a eventos de desastres com mais preparo. Normalmente, modelos hidrodinâmicos como o HEC-RAS são a primeira escolha para estimar área inundáveis e gerar mapas de susceptibilidade a inundações. (SAVAGE et al., 2014). No entanto, o uso desses modelos exige uma série de dados de entrada e alta capacidade de processamento computacional, o que dificulta sua aplicação, por exemplo, em grandes áreas. (NOBRE et al., 2016).

Diante desse contexto, mapas de inundações baseados em características geomorfológicas de Modelos Digitais de Elevação (MDE), como a altitude, vêm sendo

desenvolvidos como alternativas de baixo custo aos mapas gerados por modelos hidrodinâmicos tradicionais, especialmente na ausência de dados hidrológicos. (NOMAN et al., 2001).

O modelo *Height Above the Nearest Drainage* (HAND), ou, altura acima da drenagem mais próxima, é um descritor de terreno que calcula a diferença de elevação entre cada *pixel* de um MDE e a do ponto de drenagem mais próximo a este. O modelo foi desenvolvido por Rennó et al. (2008), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e já foi utilizado, entre outras aplicações, para a delimitação de áreas susceptíveis a inundações. (NOBRE et al. 2016). Enquanto modelos hidrodinâmicos tradicionais exigem dados como batimetria e vazão dos rios, o HAND exige apenas um MDE hidrológicamente coerente para gerar um mapa de inundação. Portanto, trata-se de uma potencial ferramenta de gestão de riscos de inundações por parte dos órgãos públicos, visto que a disponibilidade de dados topográficos é global.

Neste trabalho, o modelo HAND foi utilizado para gerar dois mapas de inundação do município de Cruz do Espírito Santo, Paraíba. No primeiro mapa, foi utilizado um Modelo Digital de Terreno (MDT) com a presença da estrutura do dique. No segundo mapa, foi utilizado um MDT do qual foi retirado a estrutura do dique, através do *software* fotogramétrico *Agisoft Photoscan*. A comparação dos dois mapas permite uma identificação imediata da influência do dique no escoamento da água na área de estudo e, conseqüentemente, sua eficácia como medida de proteção da cidade. Trata-se, portanto, do uso de uma medida não-estrutural (mapa de inundação) para verificar a eficiência de uma medida estrutural (dique).

A região urbana do município de Cruz do Espírito Santo foi escolhida como área de estudo por causa da incidência de eventos históricos de inundações ocorridos na cidade. Localizada às margens do rio Paraíba, a história da cidade está intrinsecamente ligada às cheias causadas pelo rio. De acordo com o IBGE, uma grande cheia em 1879 trouxe uma cruz de madeira aonde hoje está localizada a Praça Rio Branco. Logo, os moradores renomearam o povoado que até então se chamava Espírito Santo para Cruz do Espírito Santo. Entre 1914 e 1935, a sede do município foi transferida para Sapé por causa de um grande cheia ocorrida em 1914.

Em 1985, uma grande inundação arrasou Cruz do Espírito Santo, destruindo seu cartório eleitoral, biblioteca, prefeitura e outras repartições públicas. Então, o governo federal construiu, por meio da Secretaria de Planejamento, o dique que hoje margeia a cidade. O dique consiste, basicamente, na elevação do nível da rodovia PB-004, de forma que esta atue como uma

barreira de proteção contra as inundações do rio Paraíba. (RAMOS, 1996, apud. MENDONÇA, 2013).

Para a gerar os mapas de inundações, foram concebidos Modelos Digitais de Elevação de altíssima resolução espacial (0,27 metro), obtidos com o uso de sensoriamento remoto por meio de um Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT). Segundo Murphy et al. (2008), em modelos hidrológicos, a resolução espacial tem maior influência sobre o resultado final do que o método como o MDE foi obtido. Ainda segundo os autores, um MDE com resolução espacial de 20 metros já pode ser considerado de alta resolução. Em toda a consulta bibliográfica realizada para a produção deste trabalho, não foi encontrado nenhum outro estudo com a implementação do HAND a partir de MDE com resolução tão alta.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Analisar a eficiência do dique de Cruz do Espírito Santo, Paraíba, por meio da comparação das extensões de inundação previstas pelo modelo HAND em duas situações: com e sem o dique.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Gerar Modelos Digitais de Elevação de alta resolução para a área de estudo, que inclui o núcleo urbano de Cruz do Espírito Santo e um trecho do rio Paraíba;
- Elaborar mapas de susceptibilidade a inundação por meio do modelo HAND para a área de estudo;
- Identificar possíveis incoerências nos mapas de inundação gerados com o modelo HAND.

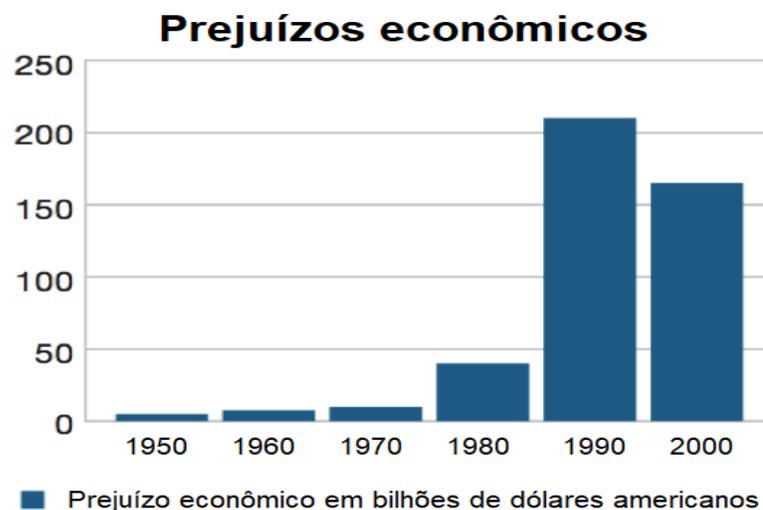
## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Inundações

As inundações representam o desastre natural mais frequente e de maior impacto à sociedade. Cerca de 40% dos desastres relacionados com fenômenos naturais são inundações e essas causam cerca de metade das mortes relacionadas a tais fenômenos. (NOJI, 1991; OHL et al., 2000). Estima-se que as inundações afetaram mais de 1,4 bilhão de pessoas e foram responsáveis pela morte de cerca de 100 mil pessoas, apenas na última década do século XX. (JONKMAN, 2005). De acordo com Moel et al. (2009), os prejuízos econômicos causados por inundações aumentaram drasticamente durante as últimas décadas, embora investimentos em medidas de proteção contra inundações também tenham aumentado.

Nos últimos 20 anos, o número de eventos de inundações reportados aumentou significativamente. Consequentemente, o número de pessoas afetadas e os danos econômicos também aumentaram. A Figura 1 mostra o crescimento dos prejuízos econômicos diretos causados pelas inundações ao longo das últimas décadas. Além dos prejuízos econômicos diretos, efeitos indiretos, como veiculação de doenças, problemas de nutrição e perdas de vidas humanas contribuem negativamente para o desenvolvimento de comunidades que precisam lidar constantemente com inundações regulares. É difícil identificar e quantificar esses impactos indiretos. No entanto, as comunidades mais pobres em geral sofrem mais com as enchentes e inundações. (JHA; BLOCK; LAMOND, 2012).

Figura 1 – Prejuízos econômicos causados por inundações nas últimas décadas

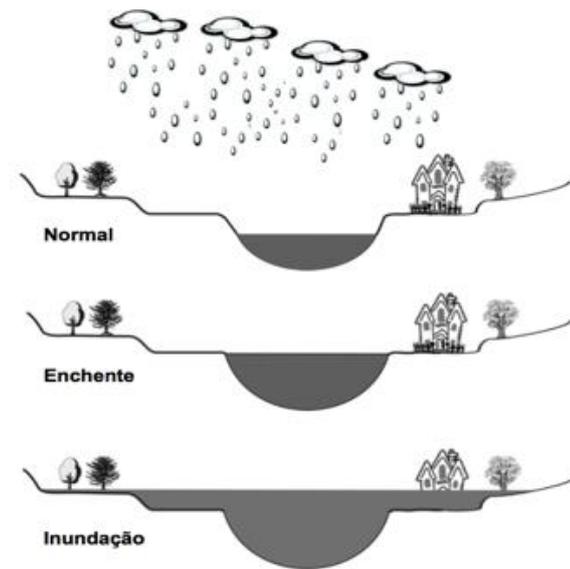


Fonte: adaptado de Jha, Block e Lamond (2012).

A inundação urbana fluvial   um fen meno tão antigo quantos as próprias aglomerações urbanas. Esse fen meno ocorre quando as chuvas são intensas e o solo não consegue infiltrar todo o volume de  gua. Assim, grande parte desse volume escoar para os rios, excedendo suas capacidades naturais de escoamento. O excesso de água inunda as regiões próximas aos rios de acordo com a topografia local, resultando no fen meno conhecido como inundação ribeirinha. Esses fen menos ocorrem de maneira irregular e em função dos eventos climáticos regionais. (TUCCI, 2003). Esses eventos podem ser agravados pela a o antrópica de urbaniza o, que resulta em impermeabiliza o das superfícies e canaliza o dos rios. (BARBOSA, 2006).

Goerl e Kobiyama (2005) diferenciam os termos enchente e inunda o. Uma enchente ocorre quando a água de um rio sobe até a altura de suas margens, sem transbordar nas regiões adjacentes. Quando as áreas transbordam o limite natural do rio, pode-se afirmar que houve uma inunda o. A Figura 2 ilustra a diferença entre enchentes e inunda es.

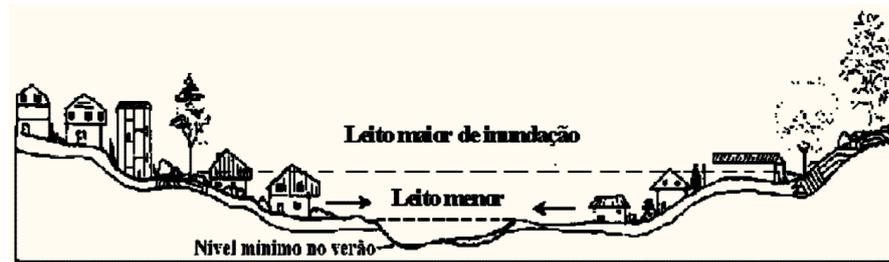
Figura 2 – Eleva o do nível de um rio, do nível normal até inunda o



Fonte: Goerl e Kobiyama (2015).

Segundo Tucci (2003), os rios normalmente possuem dois leitos: o leito menor, onde a água escoar na maior parte do tempo; e o leito maior, que geralmente   inundado a cada 1,5 e 2 anos. Os eventos de inunda es ocorrem quando as aglomera es urbanas ocupam o leito maior do rio, que são consideradas áreas propensas a risco. Através de um processo natural, os rios saem do seu leito menor em períodos de desastres por inunda es e ocupam o seu leito maior. Como esses eventos acontecem aleatoriamente ao longo do tempo, as pessoas tendem a ocupar os leitos maiores de rios, sujeitando-se a eventos de inunda es. A Figura 3 ilustra o leito menor e o leito maior de um rio ocupado por edifica es.

Figura 3 – Leito menor e leito maior de inundação



Fonte: Tucci (2003).

De acordo com Pedrosa (2006), os seguintes fatores influenciam a ocorrência de eventos de inundações:

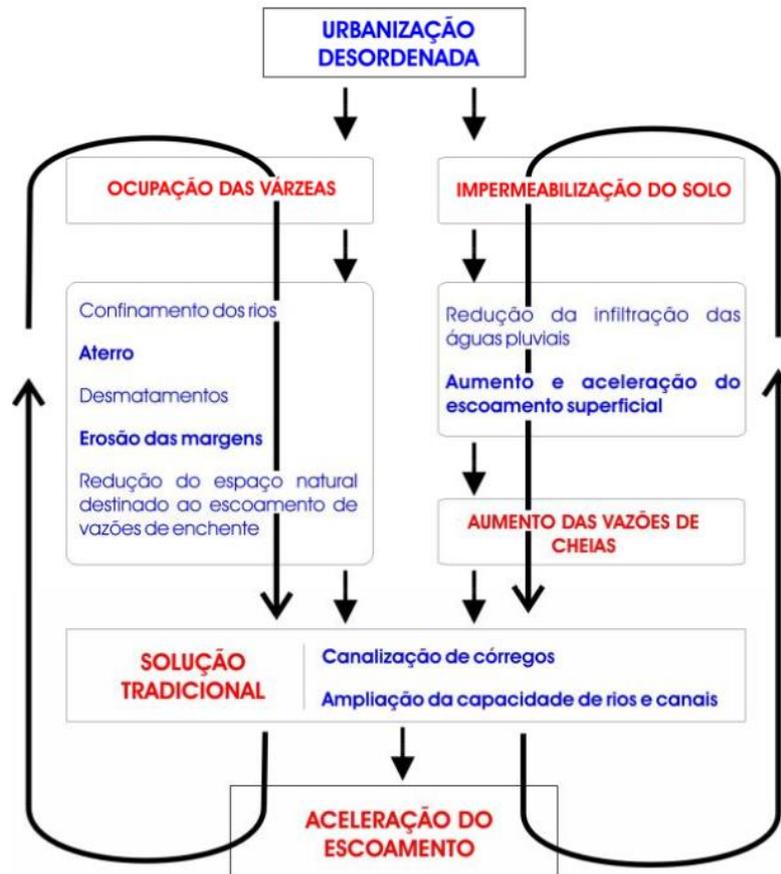
- **Características geográficas do local:** topografia, morfologia, litologia, tipo de cobertura vegetal, uso do solo, taxa de impermeabilização, hidrografia e modificações antrópicas;
- **Condições meteorológicas:** quantidade, duração, intensidade, concentração temporal e distribuição especial de precipitação em bacias hidrográficas; e,
- **Intervenções antrópicas.**

As intervenções antrópicas têm capacidade de gerar modificações profundas no ciclo hidrológico natural, resultando em impactos relevantes que muitas vezes são irreversíveis. (TUCCI, 2003). O crescimento populacional e o processo de urbanização intensificaram a quantidade de regiões sujeitas a inundações no mundo. A população humana cresceu rapidamente no último século, de 1,6 bilhão de pessoas em 1900 para 6,9 bilhões em 2010. Nesse mesmo intervalo, a porcentagem de população global vivendo em regiões urbanas aumentou de 16% em 1900 para 50% em 2010, e este número tende a continuar aumentando. (KUMMU et al., 2011). É estimado que esse valor aumente para 60% em 2030 e para 70% em 2050. Logo, espera-se que a incidência de inundações urbanas também aumente no futuro próximo em consequência da mudança na organização sócio-espacial humana. (JHA; BLOCK; LAMOND, 2012).

A urbanização em países em desenvolvimento, como o Brasil, ocorreu de forma geralmente desordenada, provocando um aumento considerável na frequência e na intensidade dos eventos de inundações. O processo de urbanização resulta em alterações hidrológicas facilmente observáveis, como o aumento dos volumes escoados e modificações nos hidrogramas de cheias. Isso ocorre principalmente por causa da impermeabilização do solo.

(PEDROSA, 2016). A Figura 4 demonstra os efeitos da urbanização desordenada nas variáveis do ciclo hidrológico.

Figura 4 – Impacto da urbanização desordenada na drenagem



Fonte: Pedrosa (2006).

Espera-se que a ocorrência de eventos extremos de inundação aumente ainda mais no futuro, especialmente devido a fatores socio-econômicos e mudanças climáticas, resultando em desastres mais sérios e mais frequentes. (IPCC, 2007; KNOX, 1993). Assim como a urbanização, as mudanças climáticas são outra tendência global que podem ter um impacto significativo no risco de inundações. As alterações nos padrões meteorológicos associadas a um clima mais quente podem aumentar a quantidade de eventos de inundações. Por exemplo, mudanças nos padrões de chuva em uma região poderiam ocasionar inundações mais frequentes ou intensas. (JHA; BLOCK; LAMOND, 2012).

No Brasil, as inundações urbanas geram prejuízos expressivos para a sociedade, visto que atingem áreas densamente povoadas. Os principais impactos causados à população são: mortes, prejuízos materiais, contaminação da água, veiculação de doenças e paralização de atividades econômicas. (TUCCI, 2003). A gestão dos riscos relacionados às inundações é uma

problemática complexa, pois envolve ações multidisciplinares sobre as bacias hidrográficas. Em geral, medidas isoladas que não consideram a bacia hidrográfica como um sistema dinâmico e integrado apenas transferem as inundações de um lugar para outro. (BARBOSA, 2006).

Segundo Tucci (2003), a problemática das inundações é agravada no Brasil porque o Plano Diretor Urbano da grande maioria das cidades da América do Sul não possui nenhuma restrição à ocupação dos espaços de riscos de inundações. Conseqüentemente, visto que as inundações podem demorar anos para ocorrer em uma determinada região, áreas ribeirinhas são invadidas por populações mais pobres ou loteadas por empresários. Segundo o autor, é necessária uma visão globalizada do planejamento urbano por parte dos órgãos responsáveis para mitigar o risco de inundações.

## **2.2 Medidas de combate a inundações**

As medidas de combate a inundações são normalmente divididas em dois tipos: estruturais e não-estruturais. As medidas estruturais visam reduzir o risco de inundações através do controle do fluxo de água nas comunidades urbanas. Neste caso, o homem modifica o curso natural rio por meio de obras de engenharia como diques, barragens e canais. As medidas não-estruturais, por sua vez, buscam manter a população segura através de um melhor planejamento e gerenciamento do desenvolvimento urbano. Neste caso, o homem convive com o rio, e utilizam-se estratégias como o mapeamento de áreas de inundações, sistemas de alertas e controle do uso do solo. As medidas estruturais e não-estruturais são complementares e, portanto, não excluem uma às outras. Geralmente, estratégias de sucesso de combate a inundações combinam ambos os tipos de medidas. (BARBOSA, 2006).

Em geral, as medidas estruturais são empregadas em regiões onde a urbanização já está consolidada. Logo, estas medidas são mais corretivas que preventivas. (WALESH, 1989). Segundo Pedrollo et al. (2011), as medidas estruturais podem ser caracterizadas como extensivas ou intensivas. As medidas intensivas, de acordo com seus objetivos, podem ser classificadas nos seguintes tipos:

- Limitadoras de escoamento, como os diques;
- Retardadoras de escoamento, como reservatórios e bacias de amortecimento; e,
- Aceleradoras de escoamento, como as canalizações.

As medidas extensivas atuam diretamente nas bacias, alterando a relação entre vazão e precipitação. Tais medidas incluem ações como recomposição da cobertura vegetal, controle da erosão do solo e uso de pequenos armazenamentos disseminados ao longo da bacia. (WALESH, 1989). Exemplos bem-sucedidos de medidas estruturais no combate de inundações incluem a Barreira do Tâmis, no Reino Unido, e as obras do Projeto Delta, nos Países Baixos. (JHA; BLOCK; LAMOND, 2012). Sem diques, mais da metade dos Países Baixos seria inundada, conforme pode ser visto na Figura 5. (RONDE; MULDER; SPANHOFF, 2003)

Figura 5 – Área dos Países Baixos que seria inundada se não houvessem diques



Fonte: adaptado de Ronde, Mulder e Spanhoff (2003).

No entanto, obras de engenharia podem não ser eficientes caso sejam atingidas por eventos mais intensos que para os quais estas foram projetadas, como, por exemplo, no trágico exemplo do Tsunami do Japão em 2011 e na falha dos diques de Nova Orleans, nos EUA, com a passagem do furacão Katrina, em 2005. Além disso, muitas vezes medidas estruturais apenas transferem o risco de inundações por reduzir o risco em um lugar e aumentar em outro. (JHA; BLOCK; LAMOND, 2012). No Brasil, as ações públicas de combate a inundações consistem majoritariamente em medidas estruturais pontuais. Por exemplo, a canalização tem sido utilizada extensivamente para resolver problemas de inundações, mas muitas vezes acaba levando o problema de um ponto a outro da bacia. A implementação de medidas estruturais sem

considerar suas consequências de maneira holística traz prejuízos altos para a sociedade. (BARBOSA, 2006).

Por estas razões, as medidas não-estruturais devem ser incorporadas a qualquer estratégia de controle de riscos de inundações. Em geral, estas medidas caracterizam-se por um custo baixo e introdução relativamente fácil. (KOBİYAMA et al., 2006). Embora não exijam investimentos iniciais elevados, medidas não-estruturais geralmente exigem sistemas de alerta eficientes e bom entendimento dos problemas de inundações. Além disso, estas medidas demandam atenção por períodos longos de anos ou até décadas sem que ocorram eventos de inundações. (JHA; BLOCK; LAMOND, 2012). O Quadro 1 exemplifica alguns dos tipos de medidas não-estruturais utilizadas no controle de inundações.

Quadro 1 – Medidas não-estruturais para controle de inundações

<b>Medida</b>	<b>Características</b>	<b>Objetivos</b>
Plano diretor	Planejamento das áreas a serem desenvolvidas e a densificação das áreas atualmente loteadas.	Evitar ocupação sem prevenção e previsão.
Zoneamento	Conjunto de regras para a ocupação das áreas de maior risco de inundação. É incorporado ao PLANO DIRETOR.	Visa à minimização futura de perdas materiais e humanas em face das grandes cheias.
Educação Ambiental	Para ser realizado junto à população. A conservação das margens dos arroios, sua vegetação típica e taludes são essenciais.	Conscientizar a população que sofre ou poderá sofrer com as inundações.
Reassentamento	Reassentamento de residentes ilegais ocupantes das margens de rios, e de residentes legais nas áreas de enchente.	Retirar a população dos locais de risco.
Sistema de alerta	Sistema utilizado para prevenir a população com antecedência de curto prazo, em eventos mais raros.	Ajudar no controle das estruturas hidráulicas no sistema do rio, e evitar o pânico.
Sistemas hidrológicos	Histórico hidrológico da bacia e modelos que mostram o comportamento hidráulico e hidrológico do sistema do rio.	Fornecer subsídios para os estudos de comportamento da bacia, assim como previsão de cenários futuros.

Fonte: adaptado de Enomoto (2004).

### **2.3 Mapas de inundação**

O mapeamento de inundações é um processo que delimita em um mapa a área coberta por água em situações de inundações. Não existe uma única metodologia para se realizar este processo, visto que existem várias abordagens para se construir um mapa de inundação. (SOUSA, 2012). O mapeamento das inundações permite que governos e as pessoas possam reagir aos potenciais desastres com mais preparo, amenizando ou até mesmo evitando os danos causados pelas inundações. Os mapas de inundações têm sido usados tradicionalmente por entidades gestoras para oferecer uma melhor resposta de emergência em casos de desastres, atuando uma ferramenta muito útil para os tomadores de decisões. (GODBOUT, 2018). Além de instituições públicas, companhias seguradoras e comissões internacionais de rios também elaboram mapas de inundação. (SOUSA, 2012).

De acordo com Shidawara (1999), o mapeamento de áreas de riscos é uma das medidas não-estruturais mais viáveis para o controle de inundações, podendo ser implementada por municípios com poucos recursos. No entanto, segundo Godbout (2018), geralmente essas ferramentas são elaboradas para áreas densamente povoadas, e não para áreas pouco povoadas.

Tucci (2005) divide os mapas de inundações em dois tipos: mapas de planejamento e alerta. Os mapas de planejamento informam quais locais serão atingidos por cheias sob determinados tempo de retorno. Os mapas de alerta, por sua vez, são inseridos em pontos específicos das áreas de risco com seus respectivos valores de cota. Essas ferramentas permitem que moradores acompanhem a inundação por meio da leitura do nível da água em régua instaladas na região.

### **2.4 Modelos hidrológicos para mapeamento de inundações**

O processo de mapeamento de inundações geralmente é realizado por meio de modelos hidrológicos. Nos modelos hidrológicos, estimam-se os picos de vazão a partir de dados pluviométricos e a partir de modelos de elevação do terreno, geram-se mapas das áreas potencialmente inundáveis. (MERWADE et al., 2008). O método mais simples de se gerar um mapa de inundação é através do cruzamento de uma superfície topográfica do terreno com uma superfície de água gerado por interpolações de níveis de água observados em um evento de inundação. (PRIESTNALL, 2000).

De acordo com Nobre et al. (2016), existe uma extensa gama de modelos hidrológicos usados para mapeamento de inundações. Os modelos hidrológicos unidimensionais (1D), como o HEC-RAS e bidimensionais (2D), como o TELEMAC-2D, são modelos hidrodinâmicos de intermediária complexidade que utilizam equações de Saint-Venant simplificadas para descrever o movimento da água. No entanto, a aplicação desses modelos exige conhecimento detalhado da geometria dos canais pluviais e de parâmetros físicos que interferem no escoamento, como a rugosidade. Além disso, as simplificações das equações hidrodinâmicas de Saint-Venant admitem suposições que ignoram a variação de parâmetros associados ao terreno e ao escoamento, como a rugosidade e as velocidades médias. Logo, esses modelos precisam ser cuidadosamente calibrados com observações em campo. (BATES; DE ROO, 2000).

Nobre et al. (2016) sugerem que os modelos hidrodinâmicos mais complexos são os tridimensionais (3D). Esses modelos representam o fluxo de água nos três eixos e possibilitam uma representação dinâmica e realista da área de inundação. No entanto, o uso desses modelos implica na necessidade de processamentos numéricos computacionais complexos e calibrações de dados intensivas. (WERNER, 2004). O advento de coleta de dados de inundações através de sensoriamento remoto e estações automatizadas facilitou a parametrização e calibração dos modelos hidrodinâmicos. No entanto, esses modelos só podem ser aplicados integralmente a rios com dados históricos de inundações, e cada evento de inundação requer uma calibração específica. (NOBRE et al., 2016).

Tendo em vista as dificuldades envolvidas na utilização dos modelos hidrodinâmicos tradicionais, ferramentas para se prever precisamente a extensão espacial de inundações potenciais não estão amplamente disponíveis. A dependência por calibração e a falta de dados sobre inundações tem impedido a aplicação em larga escala dos modelos hidrodinâmicos existentes para elaboração de mapas de inundações. (GODBOUT, 2018). Embora exista uma alta demanda ao redor do mundo, mapas de inundações de alta resolução estão disponíveis para apenas uma pequena parcela das regiões inundáveis globalmente. (WARD et al., 2013).

Uma alternativa ao uso de modelos hidrodinâmicos tradicionais para mapeamento de inundações é o uso de descritores de terrenos. Esses descritores, por sua vez, utilizam atributos geomorfológicos extraídos de um MDE que possuem alguma correlação espacial com áreas inundáveis. Como há uma maior disponibilidade geral de dados topográficos, estas ferramentas estão sendo cada vez mais usadas. (GOERL et al. 2017).

O descritor de terreno HAND foi desenvolvido por pesquisadores do INPE e apresentado pela primeira vez em 2008. Esse descritor é simplesmente um modelo digital de terreno normalizado em relação aos canais de drenagem. O uso do HAND representa uma abordagem relativamente simples para mapear a extensão total de inundação, que não depende de dados de inundações anteriores ou dados hidrológicos. O único dado de entrada necessário para gerar o HAND é um MDE corrigido. Logo, trata-se de uma ferramenta de relativo baixo custo aplicável a qualquer área com dados topográficos disponíveis. (RENNÓ et al., 2008; NOBRE et al., 2016).

## 2.5 Modelo HAND

O HAND é um descritor de terreno proposto inicialmente por Rennó et al. (2008), que já foi utilizado para diversas aplicações, sendo uma destas o mapeamento generalizado de áreas de risco e vulnerabilidade a inundações. Existe uma grande quantidade de algoritmos topográficos que permitem a extração de parâmetros quantitativos de Modelos Digitais de Elevação (MDE). Alguns exemplos desses parâmetros são: áreas de acumulação, rede de drenagem e trajetórias de escoamento superficiais.

Trata-se de um modelo digital do terreno onde cada *pixel* representa a altimetria do ponto em relação ao canal de drenagem mais próximo. Enquanto um MDE tem como referência o nível do mar para valor de cada *pixel*, o HAND toma como referência o canal de drenagem mais próximo ao *pixel* em questão. Portanto, no modelo HAND, um *pixel* com menor valor representa um ponto de maior susceptibilidade a inundação, já que este tem uma altitude baixa relativa ao canal de drenagem mais próximo. O HAND pode ser definido como uma versão de um mapa topográfico digital normalizada em relação à drenagem. (NOBRE et al, 2011; RENNO et al., 2008). Os próximos tópicos descreverão detalhadamente os passos do processamento do algoritmo HAND propostos inicialmente por Rennó et al., (2008).

### 2.5.1 Correção do MDE

De acordo com Nobre et al. (2011), MDE é um termo genérico para descrever um Modelo Digital de Superfície (MDS) ou um Modelo Digital de Terreno (MDT). Ambos são

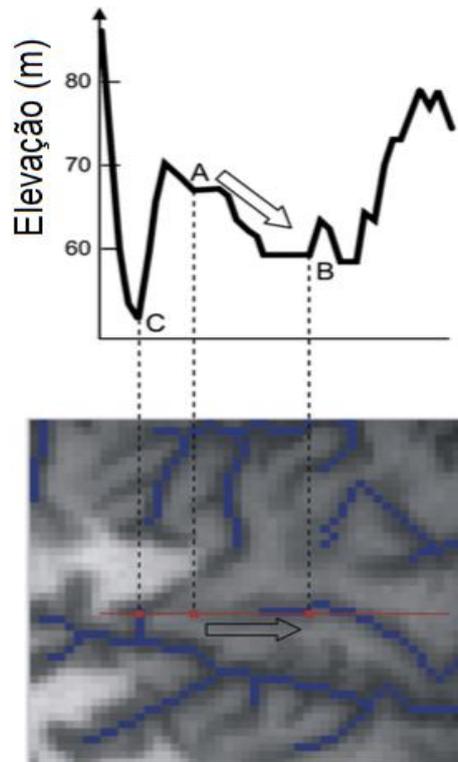
modelos que representam a superfície terrestre, e podem ser adquiridos por meio de radares, lasers, satélites ou aviões. Um MDS representa a superfície do terreno acrescida de qualquer objeto existente neste, como por exemplo árvores e edificações. Um MDT, por sua vez, representa a superfície nua do terreno, sem a presença dos objetos citados anteriormente. (CRUZ, 2011). Esses modelos podem ser utilizados para descrever o armazenamento e movimento de águas em terrenos. (MOORE et al., 1992). A representação mais comum desses modelos é através de matrizes ou imagens *raster*, onde cada um dos *pixels* tem como atributo a elevação da superfície em relação a um referencial. (BURROUGH; MCDONELL, 1988).

De acordo com Rennó et al. (2008), os Modelos Digitais de Elevação originais possuem falhas que precisam ser corrigidas antes de se prosseguir com seu processamento. Por exemplo, em áreas onde a superfície do solo é coberta por vegetação densa, é esperado que se haja um certo grau de mascaramento do relevo original. As falhas de depressão, ou *sinks*, resultantes de subestimação da elevação devem ser preenchidas, e as falhas resultantes da superestimação da elevação devem ser cortadas. (LINDSAY; CREED, 2005, apud. RENNÓ, 2008). A eliminação dos *sinks* é necessária para que se garanta a propagação do fluxo em todas as células do MDE. (GOERL et al., 2017).

### 3.5.2 Matriz de direções de drenagem locais

Com um MDE coerente, é possível gerar uma matriz de direções de drenagem locais. A topografia de um terreno está intrinsecamente associada ao movimento de águas, pois esta define a direção e velocidade do escoamento. Para uma drenagem funcional, é necessário que exista uma continuidade topológica nas direções de escoamento. A correlação hidrológica entre dois pontos em uma superfície não é a mesma que a baseada em distâncias euclidianas. Isso pode ser ilustrado com o exemplo da Figura 6. Nesta imagem, a linha vermelha indica o perfil mostrado acima, as linhas azuis representam canais de drenagem e as setas indicam a direção do escoamento. Embora o ponto A esteja espacialmente mais próximo do ponto C, ele é hidrológicamente conectado ao ponto B, pois o fluxo ocorrerá de A para B. (RENNÓ et al., 2008).

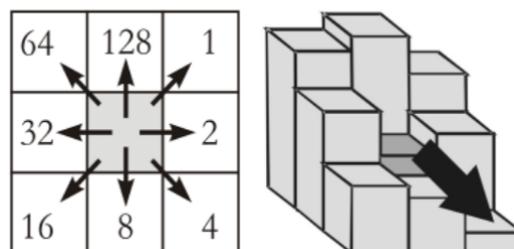
Figura 6 – Conexão hidrológica entre pontos numa superfície



Fonte: Rennó et al (2008).

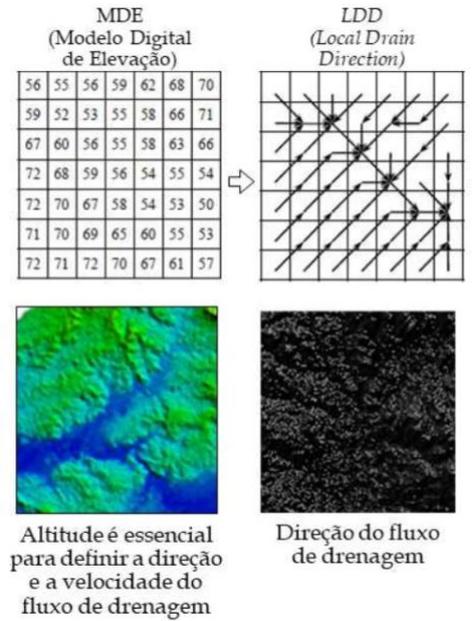
Uma matriz de direção de fluxos consiste em um *grid* onde cada *pixel* indica qual a direção do fluxo naquele ponto. Existem diversos métodos para se construir essa matriz, mas a abordagem mais simples e comumente usada é o método D8, proposto inicialmente por O'Callagh e Mark (1984). Neste método, o valor de cada *pixel* do *grid* é comparado com o valor dos seus 8 *pixels* vizinhos, e o fluxo ocorrerá para aquele vizinho mais baixo. A Figura 7 indica as 8 possibilidades de direção de fluxo em cada um dos *pixels*. Um ponto de depressão configura-se como aquele em que nenhum dos 8 vizinhos tem uma elevação mais baixa. Para esses pontos, a direção de fluxo é indeterminada. A Figura 8 ilustra a construção de uma matriz de direção de fluxos locais, também chamada de LDD, do inglês *Local Drainage Directions*.

Figura 7 – Possíveis direções de fluxo no método D8



Fonte: Buarque (2009).

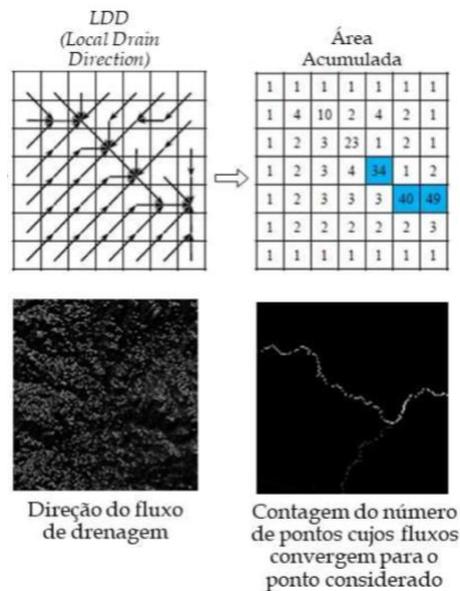
Figura 8 – Procedimento para gerar a matriz de direção de drenagem local



### 3.5.3 Matriz de área de contribuição

Tendo como base uma matriz de direções de drenagem locais, pode-se obter uma matriz de área de contribuição. Esta matriz consiste em um grid onde o valor de cada *pixel* consiste na quantidade de *pixels* cujas trajetórias de escoamento convergem para o ponto considerado. Essa etapa é necessária para que, em seguida, seja construída a matriz de rede de drenagem. (RENNÓ et al., 2008; NOBRE et al., 2011).

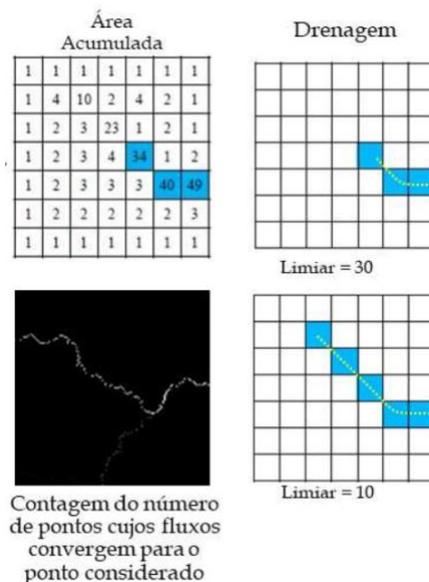
Figura 9 – Procedimento para gerar a matriz de área de contribuição



### 3.5.4 Matriz de rede de drenagem

De acordo com Rennó et al. (2008), existem vários métodos para se extrair automaticamente redes de drenagem de um MDE. Um dos métodos mais amplamente usados é o método inicialmente proposto por O'Callaghan e Mark (1984), que consiste na definição de um valor mínimo de área de contribuição para definir quais pontos do MDE são canais de drenagem. A rede de drenagem, portanto, é definida pelos pontos do *grid* com valor de área de contribuição superior a um determinado limite, chamado de limiar de drenagem. Esse processo está ilustrado na Figura 10, onde são testados dois valores para o limiar de drenagem. (RENNÓ et al., 2008).

Figura 10 – Procedimento para gerar a matriz de área acumulada



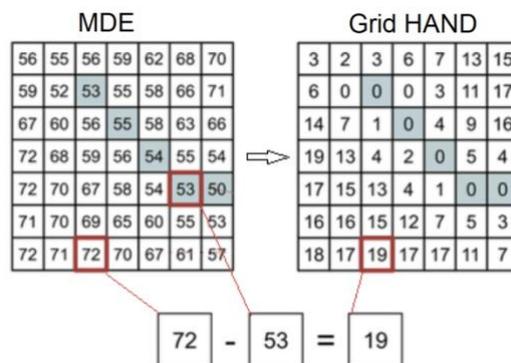
Fonte: Milanesi, Quadros e Lahm (2017).

O valor do limiar de drenagem é o único parâmetro ajustável no processo de construção do *grid* HAND. Quanto mais baixo o limiar de drenagem, maior será a densidade da rede de drenagem gerada. Para que se represente a densidade de drenagem apropriadamente, é necessário que se realizem verificações de campo ou comparações com bases cartográficas existentes. Assim, os valores de limiar de drenagem são atribuídos até que se encontre um valor que represente fidedignamente a rede de drenagem real. (RENNÓ et al, 2008; MENGUE, 2016).

### 3.5.5 Matriz HAND

Na matriz HAND, todos os *pixels* pertencentes as redes de drenagem têm suas alturas zeradas, o que implica que o potencial de drenagem ao longo do canal é desconsiderado. Embora os canais de drenagem também sejam caminhos de escoamento, o HAND considera todo o canal de drenagem como uma referência topográfica plana. A conexão de cada ponto do *grid* à sua descarga final em um canal de drenagem, permite que todo o MDE seja normalizado em relação à rede de drenagem. A Figura 11 contrasta um MDE (dado de entrada) e o resultado final do processamento do algoritmo HAND (*grid* HAND). O ponto marcado de altura 72 está hidrológicamente conectado ao ponto de drenagem de altura 53, resultando num valor do *pixel* no *grid* HAND de 19. Isso significa que o *pixel* marcado no *grid* está 19 metros acima do seu respectivo ponto de drenagem. (RENNÓ et al., 2008).

Figura 11 – Comparação de MDE e *Grid* HAND



Fonte: adaptado de Rennó et al. (2008).

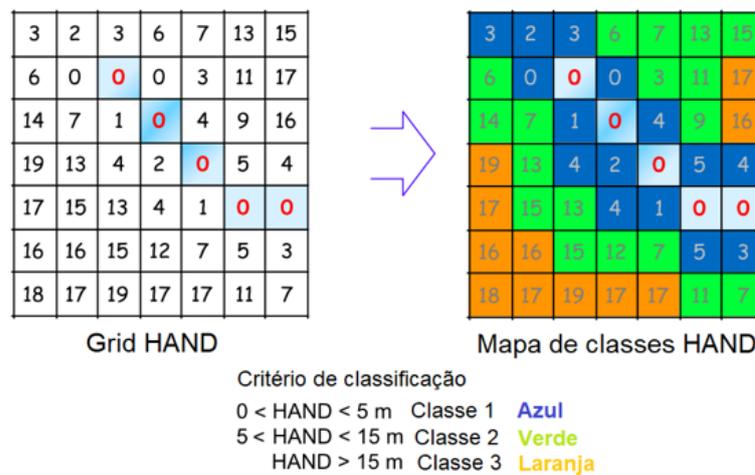
A principal diferença entre o MDE original e a matriz HAND é que o primeiro está normalizado em relação ao nível do mar, e o HAND é normalizado em relação à rede de drenagem. A matriz HAND tem relevância porque esta classifica áreas do MDE com semelhanças hidrológicas. As superfícies moldadas no modelo HAND indicam na verdade uma topologia de potenciais de drenagem locais, possuindo um significado hidrológico e prático. (NOBRE et al., 2011).

A diferença de energia potencial gravitacional entre cada célula da matriz HAND e a de seu respectivo ponto final de drenagem, através do caminho de escoamento definido no LDD, define uma propriedade permanente da célula que Nobre et al. (2011) chamam de potencial de drenagem. A classificação de todas as células da matriz de acordo com seus potenciais de

drenagem permite que estas possam ser agrupadas em classes equipotenciais, definindo ambientes ou zonas com propriedades hidrológicas semelhantes. (RENNÓ et al., 2008).

Nobre et al. (2016) sugerem um método em que se delimitam isolinhas de contorno no *grid* HAND, semelhante ao processo de extração de curvas de nível em um MDE. No entanto, nesse caso as isolinhas representam pontos de mesma altura em relação à drenagem mais próxima. Conseqüentemente, quanto menor o valor da isolinha, maior será a susceptibilidade de inundação. A Figura 12 mostra uma matriz HAND dividida de acordo em três classes de susceptibilidade a inundação.

Figura 12 – Matriz HAND dividida em classes



Fonte: adaptado de Nobre et al. (2011).

O modelo HAND foi estruturado em princípios fundamentais da hidrologia. Inicialmente, o formato do terreno condiciona as trajetórias de escoamento, e conseqüentemente, define as bacias, que são domínios topológicos hidrologicamente consistentes. As trajetórias de escoamento, por sua vez, definem relações entre diferentes pontos de uma bacia, construindo uma rede hierárquica. A gravidade impulsiona a água para baixo em gradientes topográficos através de trajetórias de energia mínima entre qualquer ponto até o ponto mais próximo de drenagem superficial. (NOBRE et al., 2011).

### 3.6 Aplicações do modelo HAND

O HAND possui aplicabilidade em uma extensa gama de áreas de estudo, como hidrologia, meteorologia, biogeoquímica, biodiversidade, conservação, uso de terra e avaliação de riscos. A diversidade de aplicações com base no HAND deve crescer ainda mais, visto que

a demanda por conhecimento de propriedades hidrológicas em terrenos é cada vez maior. (NOBRE et al., 2011).

Desde que foi sugerido inicialmente em 2008, o HAND já foi utilizado por vários pesquisadores nas mais diversas aplicações. Rennó et al. (2008) utilizaram dados topográficos da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) como entrada para aplicar o HAND a uma região da Amazônia. Nesse estudo, encontrou-se uma forte correlação entre classes topográficas definidas no HAND e condições de água no solo.

Em 2010, o modelo HAND foi empregado no projeto “Vulnerabilidade das Megacidades Brasileiras às Mudanças Climáticas”. Esse projeto teve como objetivo identificar as vulnerabilidades às mudanças climáticas das capitais de São Paulo e Rio de Janeiro por meio de um estudo multidisciplinar. O modelo HAND foi utilizado para mapear terrenos sujeitos a inundações, onde a altimetria relativa a canais de drenagem mais próximos serviu como indicador de risco de enchentes. (NOBRE et al., 2010).

Em 2012, o HAND foi aplicado na parametrização de áreas de saturação de água no solo em um modelo hidrológico distribuído da bacia hidrográfica do rio Asu, na Amazônia Central. Foi utilizado como dados de entrada um MDE da missão SRTM. O estudo concluiu que o HAND é uma ferramenta útil para a representação espacial de parâmetros hidrológicos. (CUARTAS et al., 2012). Em 2014, o modelo foi aplicado no rio Magdalena, na Colômbia, sendo validado com dados de inundações ocorridas em 2010 e 2011. Esse estudo sugeriu que a extensão de inundação gerada pelo HAND foi muito semelhante à mancha de inundação real, sem superestimções detectadas. (PÉREZ-MESA, 2014).

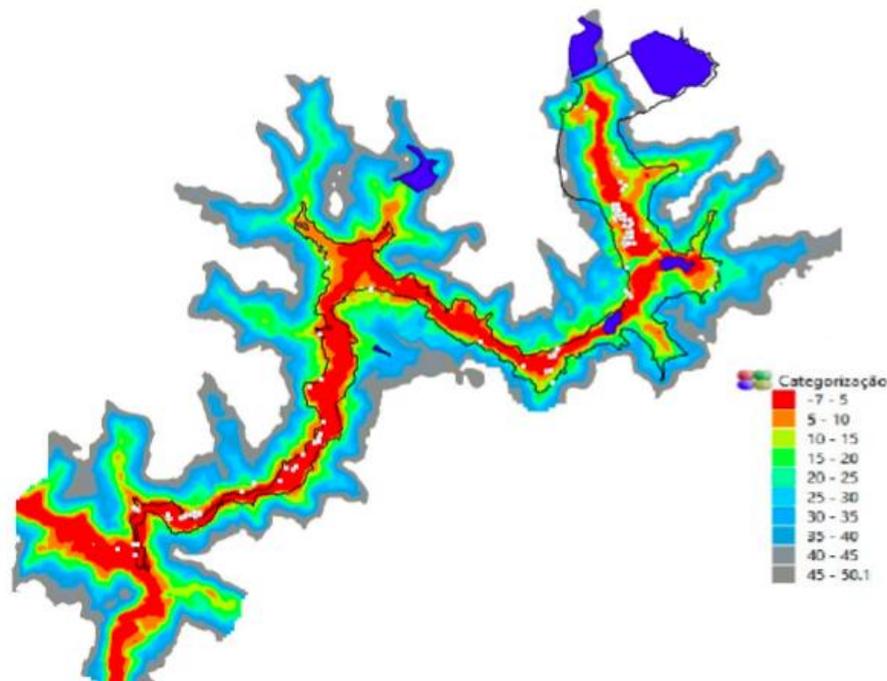
Momo et al. (2016) avaliaram o desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas susceptíveis a inundações em Blumenau e Brusque, utilizando como dados de entrada levantamentos topográficos e mapas de inundações pré-existentes da região. O estudo concluiu que o desempenho do HAND é similar ao de modelos hidrodinâmicos mais complexos, que por sua vez, exigem uma quantidade bem maior de dados da entrada.

Nos Estados Unidos da América, o HAND foi aplicado para definir áreas propensas a risco de inundação em toda a região continental do país, gerando um mapa com uma resolução de 10 metros, escala de 1:24 000 e cerca de 180 bilhões de *pixels*. O mapa gerado no estudo pode ser visto na Figura 13. (LIU et al. 2016). Num estudo dos Países Baixos, um mapa HAND foi gerado para as cidades de York e Jakarta e foi validado com meio de dados históricos de inundações coletados na rede social Twitter. (BROUWER, 2016).



O INPE realizou uma simulação da onda de lama com o modelo HAND, dividindo o mapa em classes de 5 em 5 metros. Essa simulação pode ser observada na Figura 15, onde o contorno preto indica a área real ocupada pela lama e quadrados brancos indicam edificações. Pode-se perceber que o modelo é em sua maior parte coerente com a mancha de lama real. Segundo o INPE, no entanto, falhas no modelo podem ocorrer devido a incertezas provenientes do MDE. (INPE, 2019a).

Figura 15 – Simulação do HAND da mancha de lama da barragem de Brumadinho, MG



Fonte: INPE (2019a).

### 3.7 Utilização de SIGs no mapeamento de inundações

As geotecnologias são um conjunto de tecnologias que visam coletar, processar, analisar e gerar informações referenciadas geograficamente. Entre essas tecnologias pode-se citar: Sistemas de Informações Geográficas (SIG), sensoriamento remoto, Sistema de Posicionamento Global (GPS) e cartografia digital. (ROSA, 2005). O avanço das geotecnologias tem sido particularmente útil no controle de riscos de inundações, propiciando o desenvolvimento de mapas de inundações com informações espaciais mais precisas. (SAVAGE et al., 2014).

Sensoriamento remoto é o conjunto de técnicas que utiliza sensores para obter informações sobre objetos ou fenômenos, sem que haja contato direto entre eles. Devido a seu

relativo baixo custo e a facilidade de se obter grandes quantidades de informações, é uma tecnologia aplicada em diversas áreas de estudo. A utilização de dados de sensoriamento remoto na modelagem de inundações permite que se gerem mapas em larga escala sem a necessidade de estudos de campo específicos em cada rio. (GODBOUT, 2018). Técnicas como modelagem e análise espacial em SIG, que geralmente utilizam dados provenientes de sensoriamento remoto, permitem que áreas propensas a risco de desastres ambientais sejam mapeadas com economia de custo e tempo. (OPOLOT, 2013; TAKEDA et al., 2013).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo consiste em um recorte de 90 hectares que contém a maior parte da mancha urbana do município de Cruz do Espírito Santo e um trecho do rio Paraíba (Figura 17). O município de Cruz do Espírito localiza-se na mesorregião da Zona da Mata da Paraíba, sendo integrante da Região Metropolitana de João Pessoa.

Figura 16 – Delimitação da área de estudo: parte da zona urbana da cidade de Cruz do Espírito Santo, PB



Fonte: Google Earth (2019).

Essa região foi escolhida como área de estudo pela alta incidência de registros históricos de inundações no município. As inundações são uma característica do baixo curso do rio Paraíba, devido em parte a seu leito impermeável nos alto e médio cursos. As cheias, causadas por padrões de chuvas irregulares, são geralmente súbitas e violentas e arrastam grande volume de água, causando grandes prejuízos. Há registros históricos de eventos intensos de inundação nos anos de 1641, 1698, 1713, 1728, 1731, 1780, 1789, 1919, 1924, 1927, 1985 e 2004. A frequência e intensidade das cheias no rio Paraíba diminuíram com a construção do açude Epitácio Pessoa em 1956, no médio curso do rio. (ANDRADE, 1997; SILVA, 2010).

A grande inundação no município de Cruz do Espírito Santo em 1985 motivou a construção de um dique pelo governo federal, para proteger a cidade de futuras inundações. O dique está localizado na região central da área de estudo, sob a rodovia PB-084. Cabe ressaltar que, antes da construção do dique, a rodovia PB-084 cruzava o centro da cidade, onde hoje são localizadas as ruas Dr. João Úrsulo e César Cartaxo. No entanto, com a construção do dique, esta foi deslocada ao sul por onde passa atualmente margeando o rio Paraíba. (RAMOS, 1996, apud MENDONÇA, 2013).

O município de Cruz do Espírito Santo está localizado sobre uma das margens do baixo curso do rio Paraíba (Figura 17), inserido nos domínios da bacia hidrográfica do rio Paraíba. O rio Paraíba é o mais importante do Estado, por causa de sua extensão e por cruzar a região mais urbanizada e industrializada da Paraíba, incluindo a capital João Pessoa. O rio é considerado perene do seu médio curso até a foz, incluindo a região que passa por Cruz do Espírito Santo. A bacia hidrográfica do rio Paraíba abrange uma área de 18 000 km<sup>2</sup>, ou 32% da extensão territorial do Estado. Ela drena totalmente ou parcialmente territórios de 85 municípios, com população total de cerca de 1.900.000 habitantes, ou 53% da população do Estado. (PARAÍBA, 2006).

Figura 17 – Cruz do Espírito Santo e rio Paraíba



Fonte: autor.

A bacia hidrográfica do rio Paraíba possui uma capacidade de armazenamento hídrico de mais um bilhão de m<sup>3</sup> de água. Entre os açudes mais importantes da bacia estão o Presidente

Epitácio Pessoa, com capacidade de 410 milhões de m<sup>3</sup>, e o Acauã, com capacidade de 250 milhões de m<sup>3</sup> de água. Logo, a bacia hidrográfica do rio Paraíba representa uma dos maiores reservatórios hídricos do Estado, tendo relevância para atividades econômicas, de irrigação e de abastecimento humano. (XAVIER et al., 2012). Um dos objetivos da barragem de Acauã, construída em 2002, foi de regularizar a vazão do baixo curso do rio Paraíba e controlar as enchentes das cidades Salgado de São Félix, Itabaiana, São Miguel de Taipu, Cruz do Espírito Santo e Cabedelo. (NETO; SILVA; ALCÂNTARA, 2016).

### 3.2 Obtenção do MDE

#### 3.2.1 Coleta das imagens

Para coletar as imagens aéreas da área de estudo, utilizou-se um VANT, cujo modelo foi o *Phantom 4 Pro* (Figura 18), fabricado pela DJI, que pesa 1,38 kg e pode chegar a uma velocidade de 72 km/hora. Tem uma câmera acoplada, que grava vídeos em resolução 4K e captura fotos com resolução de 20 megapixels. O *Phantom 4 Pro* é controlado por um controle remoto no qual pode ser acoplado um tablet ou um smartphone.

Figura 18 – VANT DJI *Phantom 4 Pro*



Fonte: DJI. (2019)

Visto que a bateria do VANT é limitada, a coleta das imagens foi dividida em 2 voos. Cada voo teve uma duração de cerca de 15 minutos, incluindo uma margem para que o VANT voltasse ao ponto de lançamento em segurança. Para cada um dos voos, foi escolhida uma região aberta e livre de interferências magnéticas para a decolagem do VANT. No total, foram coletadas 345 imagens aéreas.

Não se utilizaram pontos de controle no mapeamento aéreo, visto que seu uso não interfere no objetivo de gerar mapas de inundação da área de estudo. Os pontos de controle são objetos do terreno com coordenadas precisas e conhecidas, utilizados para aumentar a acurácia do georreferenciamento de um mapeamento aéreo. (NETO, 2015). O VANT utilizado tem um GPS de navegação acoplado, com uma faixa de precisão de deslocamento horizontal de  $\pm 1,5$  metro. Como no processamento posterior das imagens todas as imagens são alinhadas umas às outras, o resultado final é um MDE com um erro máximo de georreferenciamento horizontal de 1,5 metro. Esse erro não implica em nenhuma consequência negativa para o objetivo final do trabalho.

### 3.2.2 Processamento das imagens

Para processar as imagens aéreas obtidas pelo VANT, utilizou-se o software *Agisoft Photoscan Professional 1.4.5*, uma ferramenta profissional que realiza processamento fotogramétrico de imagens digitais para ser usadas em aplicações SIG. Inicialmente, o *Agisoft Photoscan Professional* foi usado para ortoretificar, georreferenciar e mosaicar as imagens obtidas com o VANT. Para cada um dos voos executados, foi realizada a seguinte sequência de processamento:

- **Alinhamento das imagens:** as imagens foram georreferenciadas no sistema de referência geodésico SIRGAS 2000;
- **Criação da nuvem de pontos:** cada voo gerou uma nuvem de cerca de 16 milhões de pontos;
- **Criação do MDS:** o MDS foi extraído automaticamente a partir das nuvens densas de pontos, incluindo todas as características do terreno, como edificações e árvores;
- **Criação do ortomosaico:** os ortomosaicos foram extraídos a partir da nuvem densa de pontos; e,
- **Criação do MDT:** objetos como árvores e edificações foram retirados das nuvens densas de pontos. O *Agisoft Photoscan Professional* interpola as regiões extraídas com valores obtidos ao redor da região.

Como este trabalho buscou avaliar a eficácia do dique de Cruz do Espírito Santo, foram gerados dois Modelos Digitais de Terreno para cada um dos voos. No primeiro MDT, objetos

como árvores e edificações foram retirados da superfície. No segundo MDT, além dos objetos já citados, também foi retirado o dique. Isso permitiu a comparação dos mapas de inundações gerados em duas situações: com e sem o dique. Para se retirar o dique da nuvem densa de pontos, utilizou-se o mesmo procedimento que o usado para a retirada de árvores e edificações. O dique e seu entorno foram selecionados e classificados como não sendo parte do terreno. No processo de construção do MDT, a região que antes era ocupada pelo dique foi interpolada com valores das regiões que margeiam o mesmo. Nesse processo, o entorno do dique também foi selecionado e interpolado, visto que a implementação de um dique gera movimento de terra no entorno. O procedimento descrito acima permitiu a construção de um MDT coerente que se aproxima do MDT da área de estudo antes da implementação do dique. O Quadro 2 reúne informações dos quatro Modelos Digitais de Terreno gerados.

Quadro 2 – Modelos Digitais de Terreno gerados

<b>MDT</b>	<b>Voo</b>	<b>Resolução</b>	<b>Presença do dique</b>
MDT_1	1	0,27m	Sim
MDT_2	1	0,27m	Não
MDT_3	2	0,27m	Sim
MDT_4	2	0,27m	Não

Fonte: autor.

### 3.3 Processamento dos mapas de inundação com o modelo HAND

Para o processamento dos mapas de inundação HAND, foram utilizados o *plugin* TerraHidro, que é integrado ao *software* TerraView, e o *software* ArcMap, do pacote ArcGis. O TerraHidro é uma plataforma para trabalho com aplicações envolvendo modelagem hidrológica desenvolvida pelo INPE. O *plugin* permite a simulação de situações ambientais envolvendo recursos hídricos superficiais e subterrâneos, uso do solo, precipitação e tipos de solo, a partir de modelos digitais de elevação (INPE, 2019b). Segundo o INPE (2019b), algumas das funcionalidades do TerraHidro são:

- Extração de redes de drenagem;

- Delimitação de áreas de contribuição para pontos isolados ou segmentos de drenagem;
- Delimitação de lençóis freáticos, através do modelo HAND;
- Delimitação de áreas de inundação, através do modelo HAND.

O TerraHidro possui rotinas incorporadas para o tratamento do MDT, eliminando incoerências. Utilizou-se a ferramenta *Hydrological Tools* para se prosseguir com as seguintes etapas do processamento:

- **Correção de incoerências altimétricas do MDT:** o MDT é condicionado hidrologicamente de acordo com o objetivo do trabalho. Objetivos hidrológicos diferentes podem exigir etapas de pré-processamento do MDT distintas. Nesse caso, é aplicado o método *breaching depressions*, que remove depressões;
- **Criação da matriz de direções de drenagem locais:** utiliza-se a função *Flow Extraction*. Tem como dado de entrada o MDT coerente;
- **Criação da matriz de área de contribuição:** utiliza-se a função *Contributing Area*. Tem como dado de entrada a matriz de direções de drenagem locais;
- **Criação da matriz de rede de drenagem:** utiliza-se a função *Drainage Extraction*. Tem como dado de entrada a matriz de área de contribuição e o valor do limiar de drenagem. O limiar de drenagem deve ser inicialmente arbitrado e posteriormente alterado, até que se encontre um valor que gere uma rede de drenagem semelhante à rede de drenagem real. Para isso, foram utilizadas bases cartográficas hidrológicas da região para identificar a rede de drenagem local;
- **Criação de gráfico de direções de drenagem locais:** utiliza-se a função *Create Graph* para indicar visualmente as direções de fluxo em cada célula da matriz. Tem como dado de entrada a matriz de direção de drenagem locais; e,
- **Criação da matriz HAND:** utiliza-se a função HAND. Tem como dados de entrada o MDT hidrologicamente coerente, a matriz de direções de drenagem locais e a matriz de rede de drenagem.

A partir da matriz HAND gerada, utilizou-se o *software* ArcMap para classificar a mancha de inundação em três zonas que possuem risco potencial de inundação. (NOBRE et al., 2011). As classes foram divididas de acordo com a sua susceptibilidade de inundação. Assim, foram criadas três classes:

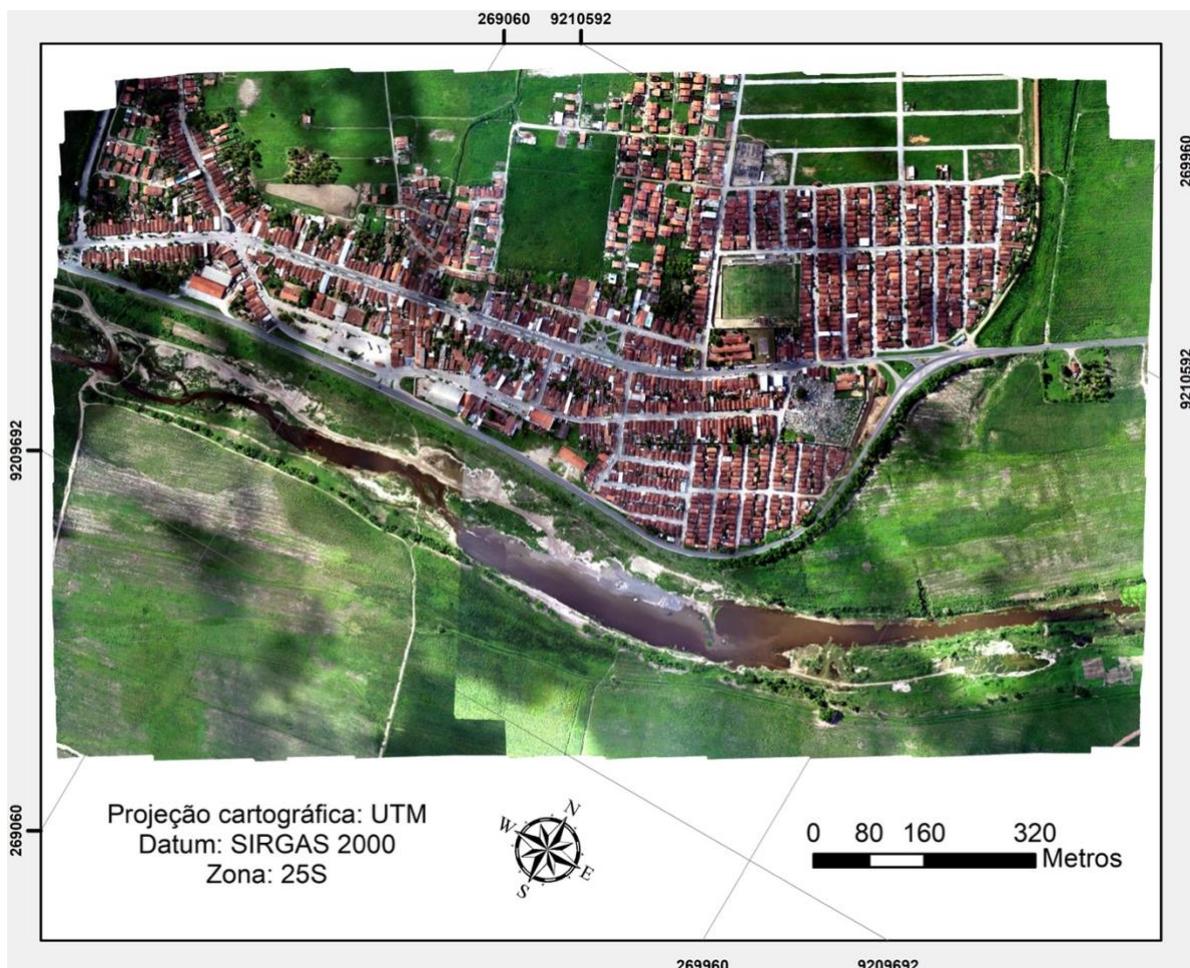
- Susceptibilidade muito alta: 0 – 3 metros;
- Susceptibilidade alta: 3 – 6 metros;
- Susceptibilidade média: 6 – 9 metros.

Para validar a mancha de inundação gerada pelo HAND, foram coletadas informações com moradores locais sobre a altura da cota da inundação ocorrida em 1985, visto que não há mapeamentos oficiais da extensão desse evento de inundação, nem tampouco marcas visíveis remanescentes da inundação em edificações. Logo, a mancha do HAND foi delineada de forma que seu nível fosse uniforme e coincidissem com o evento real de inundação em 1985. Esse evento foi escolhido por se tratar do último grande evento de inundação, sendo a primeira vez que as águas penetraram a igreja matriz da cidade. (RAMOS, 1996, apud. MENDONÇA, 2013).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir das imagens aéreas foram gerados um ortomosaico da área de estudo (Figura 19) e Modelos Digitais de Elevação (Figuras 20, 21 e 22). A Figura 20 apresenta o MDS da área de estudo, ao qual não foi aplicado nenhum processo de interpolação de vazios. Nesta Figura, pode-se observar que a rodovia PB-004, nas margens do rio, apresenta uma elevação maior que as ruas adjacentes à rodovia, indicando a presença do dique.

Figura 19 – Ortomosaico da área de estudo

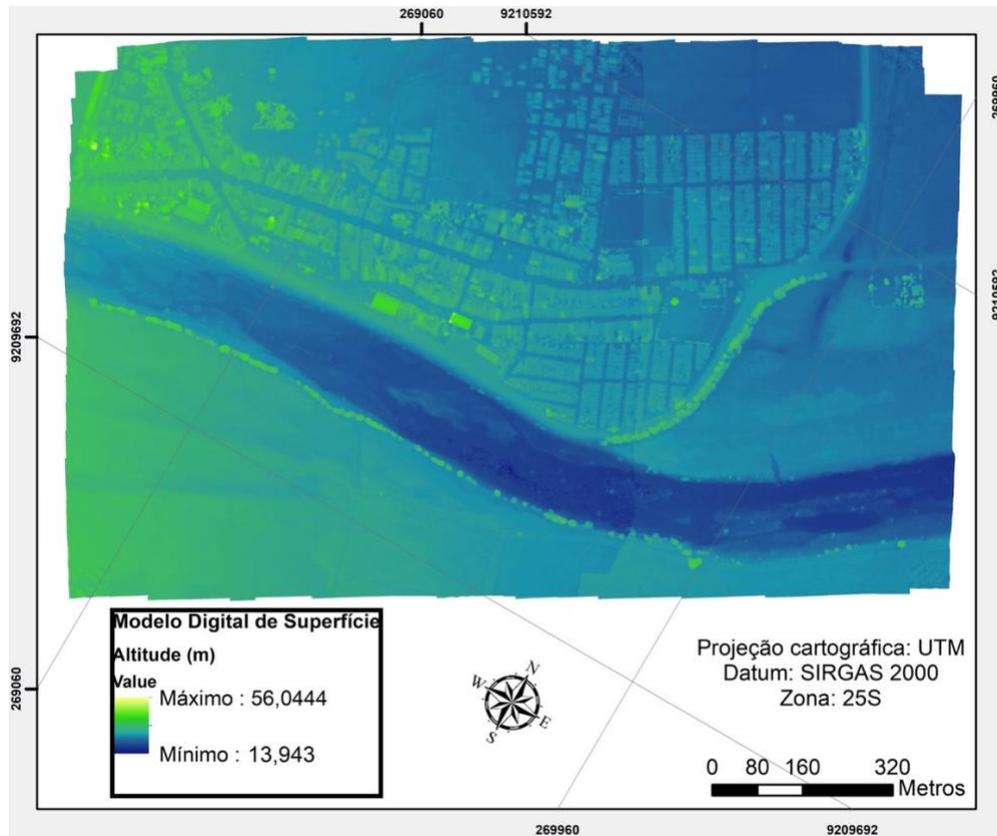


Fonte: autor.

A Figura 21 mostra o primeiro MDT da área de estudo, do qual foram retirados objetos como edificações e árvores, mas se manteve a estrutura do dique. O dique é representado pela região com tons mais fortes de verde acima da margem esquerda do rio.

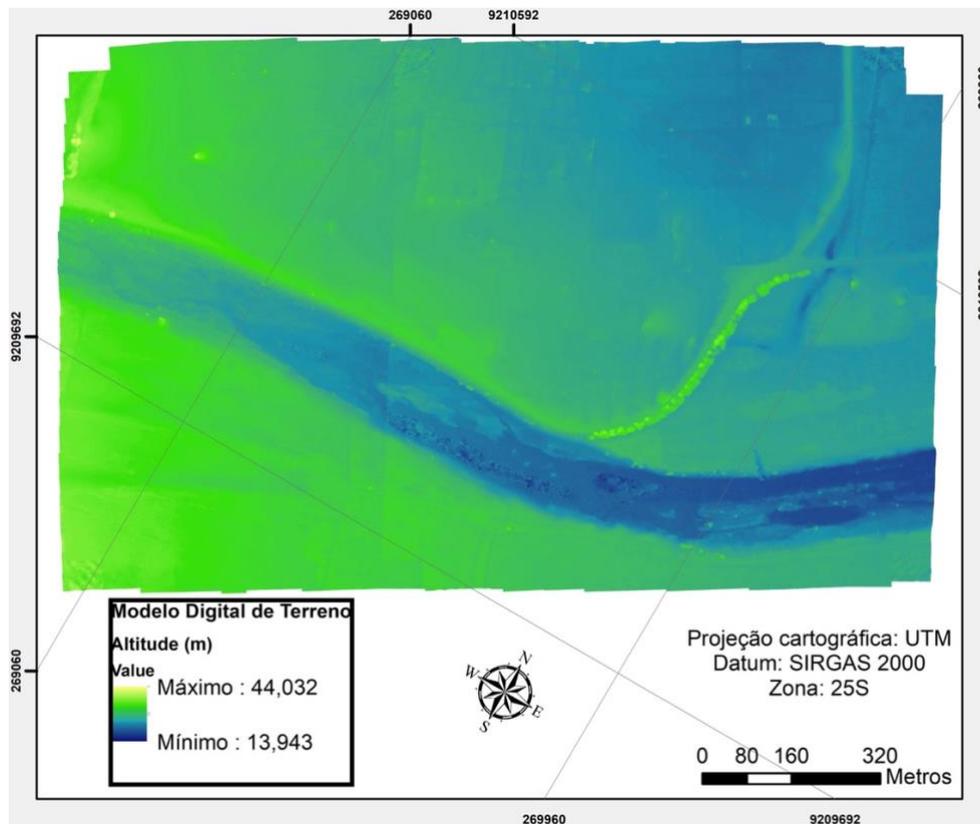
A Figura 22 mostra o segundo MDT da área de estudo, do qual foram retirados não só objetos como edificações e árvores, mas também a estrutura do dique. Este MDT representa uma aproximação do MDT real da área de estudo em 1985, antes da construção do dique. Entre

Figura 20 – Modelo Digital de Superfície da área de estudo



Fonte: autor.

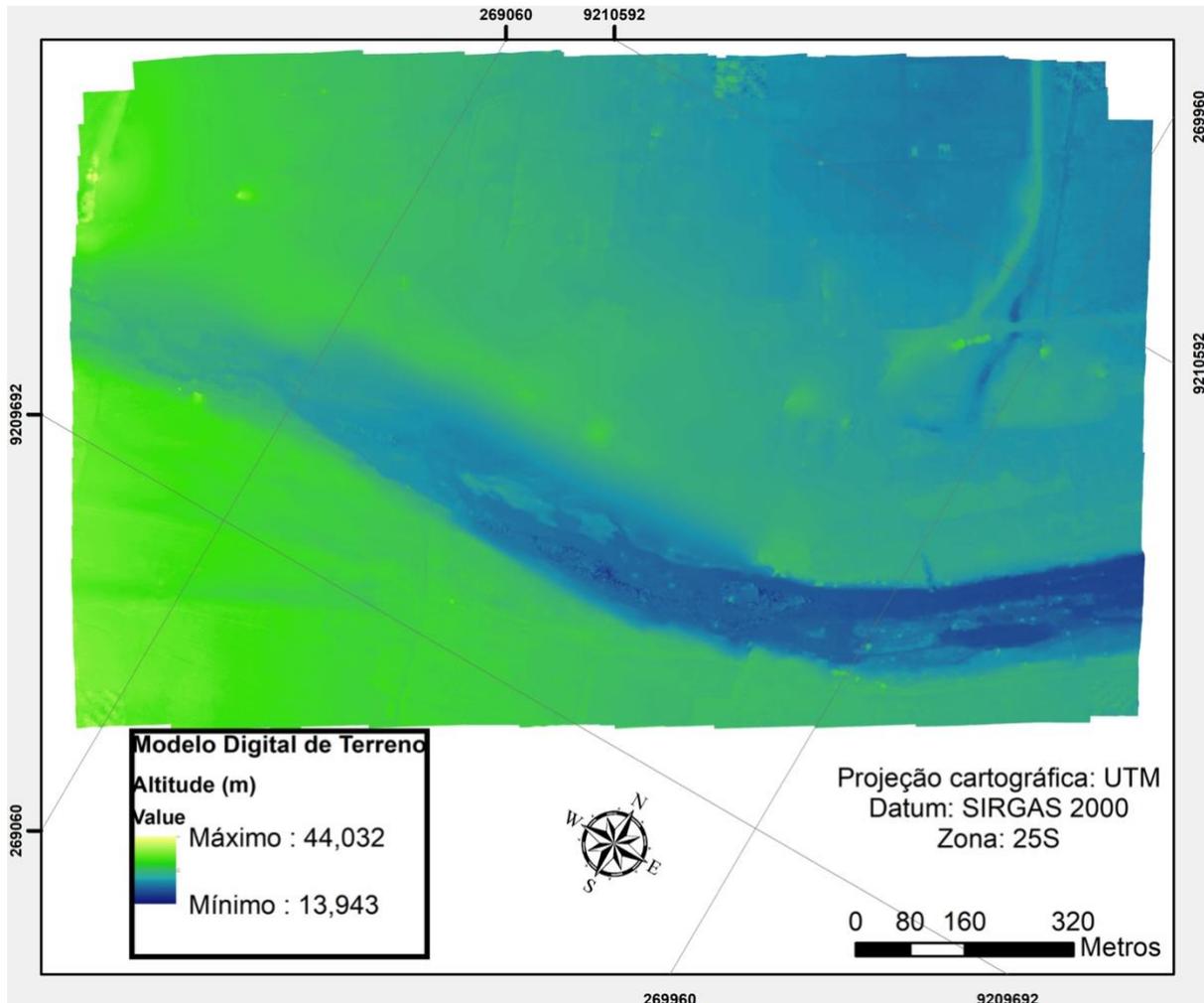
Figura 21 – Modelo Digital de Terreno da área de estudo (com dique)



Fonte: autor.

o MDS e os MDT gerados, observa-se uma diferença na elevação máxima de 56 metros para 44 metros, já que os pontos mais altos da superfície (telhados de edificações e copas das árvores) foram retirados.

Figura 22 – Modelo Digital de Terreno da área de estudo (sem dique)



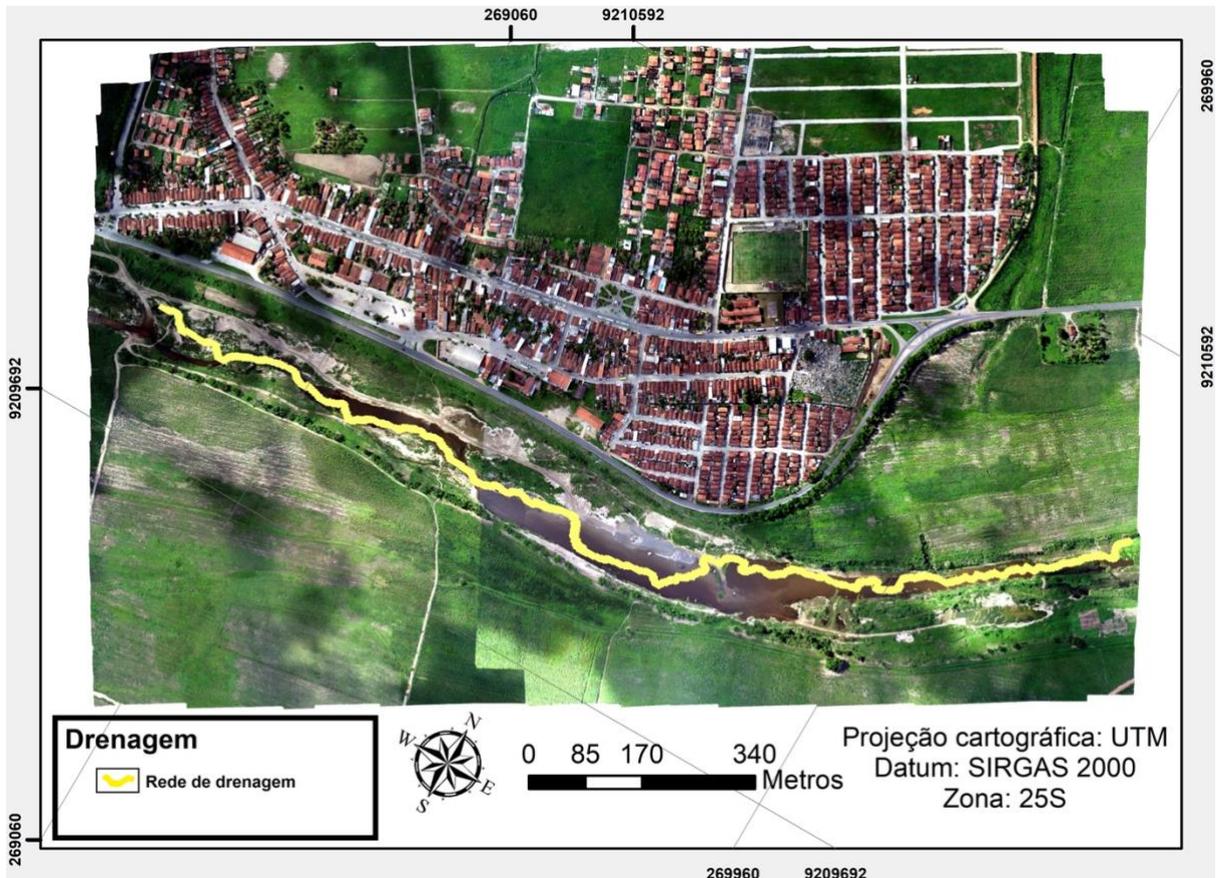
Fonte: autor.

Durante o processamento da mancha de inundação HAND, mais especificamente na etapa da geração da matriz de rede de drenagem, adotou-se um valor inicial de limiar de drenagem de 49.914, conforme sugerido pelo TerraHidro. Isso significa que, todos os *pixels* da matriz de área de contribuição com valor maior de 49.914 foram considerados canais de drenagem. Esse valor gerou uma rede de drenagem extremamente densa, e que, obviamente, não se tratava de rede de drenagem existente.

Foi utilizada uma base cartográfica disponibilizada pela Agência Executiva de Gestão de Águas da Paraíba (AESAPB) para tomar como referência a rede de drenagem real da região. De acordo com essa base cartográfica, o único canal de drenagem da área de estudo era o trecho principal do rio Paraíba. Assim, o valor de limiar de drenagem foi ajustado por tentativa e erro

até 1.450.000, quando a rede de drenagem gerada se assemelhou a rede de drenagem real. A Figura 23 apresenta a rede de drenagem gerada no TerraView sobreposta ao ortomosaico da área de estudo.

Figura 23 – Rede de drenagem da área de estudo



Fonte: autor.

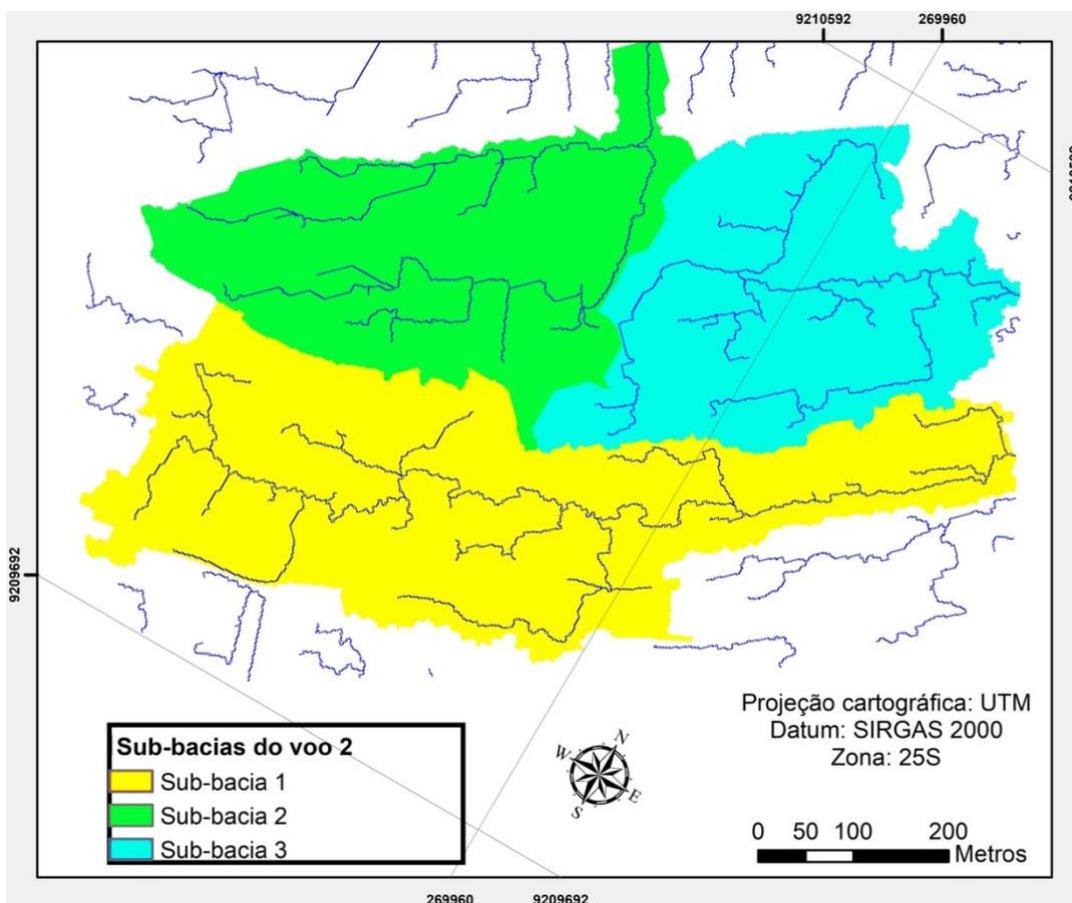
O valor de limiar de drenagem é alto em comparação com o de outros estudos porque, neste caso, se utilizou um MDE com resolução espacial muito alta. Nobre et al. (2016) perceberam que diferentes valores de limiares de drenagem resultaram em diferentes níveis de superestimação da mancha de inundação do HAND em relação à mancha de inundação real. Logo, a acurácia da mancha de inundação gerada está diretamente ligada ao valor de limiar de drenagem definido.

Inicialmente, foram encontradas algumas incoerências na mancha de inundação ao se processar a matriz HAND com os Modelos Digitais de Elevação originais. Algumas regiões da área de estudo apresentaram valores nulos na matriz HAND. Isto aconteceu porque não havia trajetórias de escoamento conectando os pontos dessas regiões a qualquer canal de drenagem definidos na rede de drenagem. Como consequência, a extensão da região HAND calculada foi

na verdade menor que a mancha de inundação da cheia de 1985, impossibilitando a validação do estudo.

A partir da função *Mini Basins* da caixa de ferramentas hidrológicas do TerraView, identificou-se a presença de três sub-bacias no MDT original do voo 2 (Figura 24). Na Figura 24, foi gerada uma rede de drenagem densa com limiar de drenagem baixo apenas para ilustrar que não existia conexão hidrológica entre os domínios das três sub-bacias. Logo, ao ser gerado a matriz HAND, foram encontrados valores na região da bacia inferior (amarela), pois esta era a única região que estava conectada hidrológicamente ao canal de drenagem (rio Paraíba).

Figura 24 – Sub-bacias do voo 2



Fonte: autor.

Pode-se constatar que a região de ausência de conexão hidrológica entre as três bacias era justamente a área ocupada pelo dique. Isso indica que, embora o dique tenha sido retirado na criação no MDT, a região do entorno ainda apresentava uma barreira ao escoamento. O MDT foi gerado novamente e, desta vez, cerca de 6 metros a partir de cada um dos canteiros laterais da rodovia foram retirados (Figura 22). Foram geradas novas matrizes HAND e estas estavam

coerentes com a mancha de inundação do evento de 1985, possibilitando a validação do modelo utilizado.

O HAND não prediz a altura de uma inundação, já que não trabalha com dados hidrológicos como vazão ou precipitação. No entanto, quando dada uma altura de inundação, o modelo gera uma extensão de inundação. Logo, para validar a mancha de inundação HAND, foram adquiridas informações com os moradores antigos da cidade sobre os limites da inundação da cheia de 1985, já que não há dados oficiais sobre a extensão de inundação. Entre os pontos inundados nesse evento estão a igreja matriz e a Escola Estadual Flávio Ribeiro Coutinho, localizadas na rua Lourival Lacerda. Nesses pontos, a altura da inundação chegou a cerca de 1 metro. De acordo com as informações dos moradores, os limites da inundação chegaram a uma cota que está a cerca de nove metros acima do nível do rio Paraíba no momento em que foi realizado o levantamento fotogramétrico.

Neste trabalho, o método usado para definir a mancha de inundação real foi limitado à pouca quantidade de dados disponíveis. Foram usados apenas três pontos com cotas de inundação, todos próximos à região da igreja matriz. Assim, a mancha de inundação da Figura 25 é mais precisa nas regiões próximas a esses pontos. Um estudo anterior com o HAND mostra que ele tem uma maior tendência de superestimar ou subestimar a mancha de inundação nos pontos mais distantes das estações de medição do nível da água. (MENGUE et al., 2016). O uso de poucos pontos, no entanto, não afetou o objetivo geral do trabalho: atestar a eficiência do dique de Cruz do Espírito Santo.

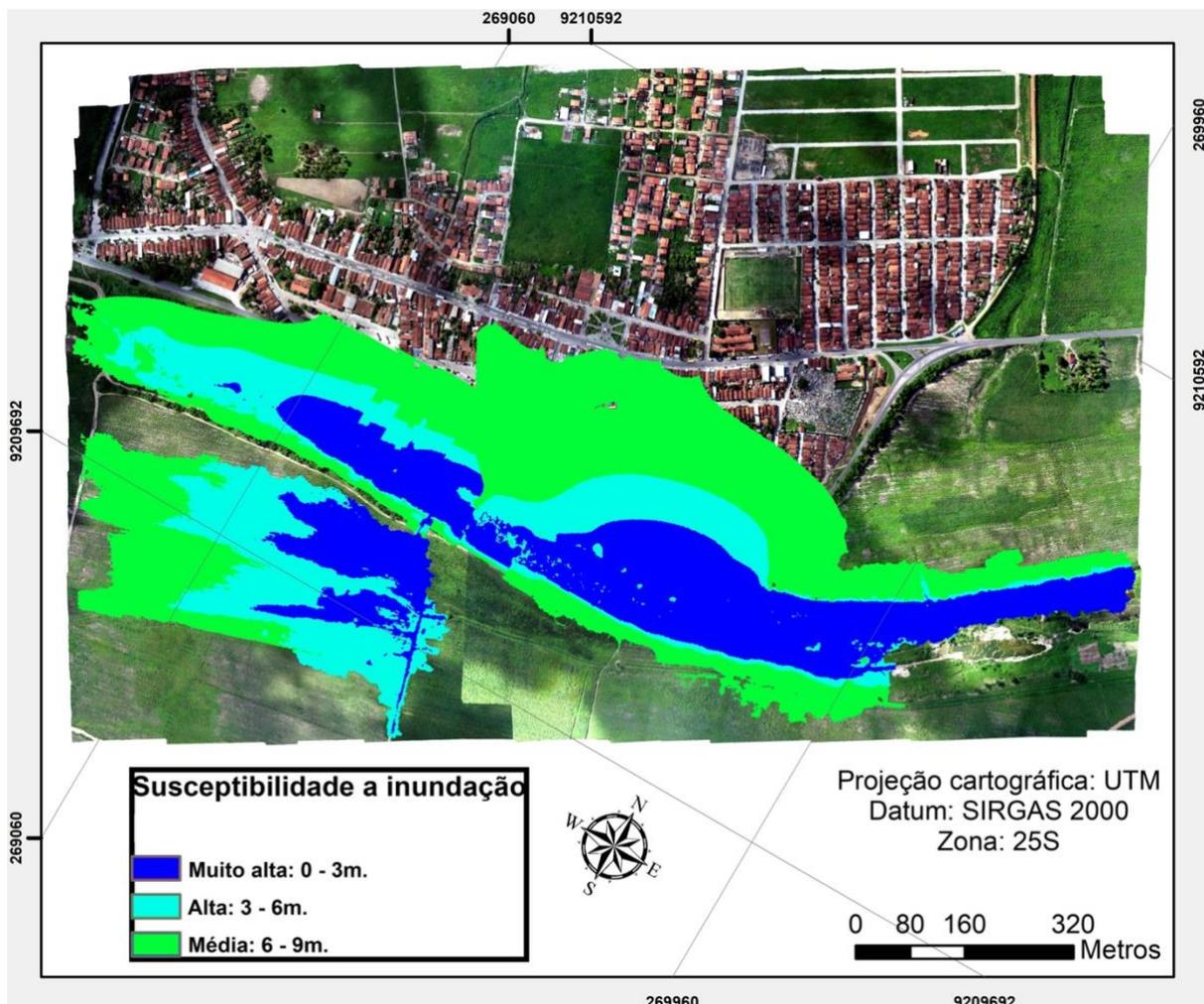
Existem métodos mais precisos para obter-se a extensão real de eventos de inundações. Por exemplo, Refosco et al. (2013) mapearam 330 pontos de uma inundação de 2011 em Blumenau, SC, com um GPS geodésico a partir de marcas d'água e informações dos moradores. Os níveis obtidos foram interpolados para criar um mapa com a extensão da cheia. Outra técnica é o uso de sensoriamento remoto, onde a extensão da cheia pode ser mapeada por satélites (Figura 14) ou por “drones”.

Andrade (1997) descreveu dois tipos de cheias do rio Paraíba: as ordinárias, com níveis de 4 a 5 metros sobre a vazante extrema; e as extraordinárias, que elevam as águas do rio entre 8 a 9 metros. De acordo com essa classificação, portanto, o evento de inundação de 1985 pode ser considerado uma cheia extraordinária.

Com base nas informações históricas do evento de 1985, foram geradas curvas de nível de 3m, 6m e 9m na imagem HAND. Foi utilizada a ferramenta de edição de legendas do

TerraView para exibir apenas os valores de 0m a 3m (azul escuro), 3m a 6m (azul ciano) e 6m a 9m (verde). Como o limite superior definido foi de 9m, nenhum *pixel* com valor maior de nove foi exibido na mancha de inundação gerada. Os arquivos *raster* com as manchas de inundação foram então sobrepostos com o ortomosaico no SIG ArcMap. A Figura 25 apresenta a mancha de inundação para a situação em que o dique foi retirado, e a Figura 26 mostra a mancha de inundação para a situação em que há a presença da estrutura do dique no MDT.

Figura 25 – Mancha de inundação de HAND (sem o dique)

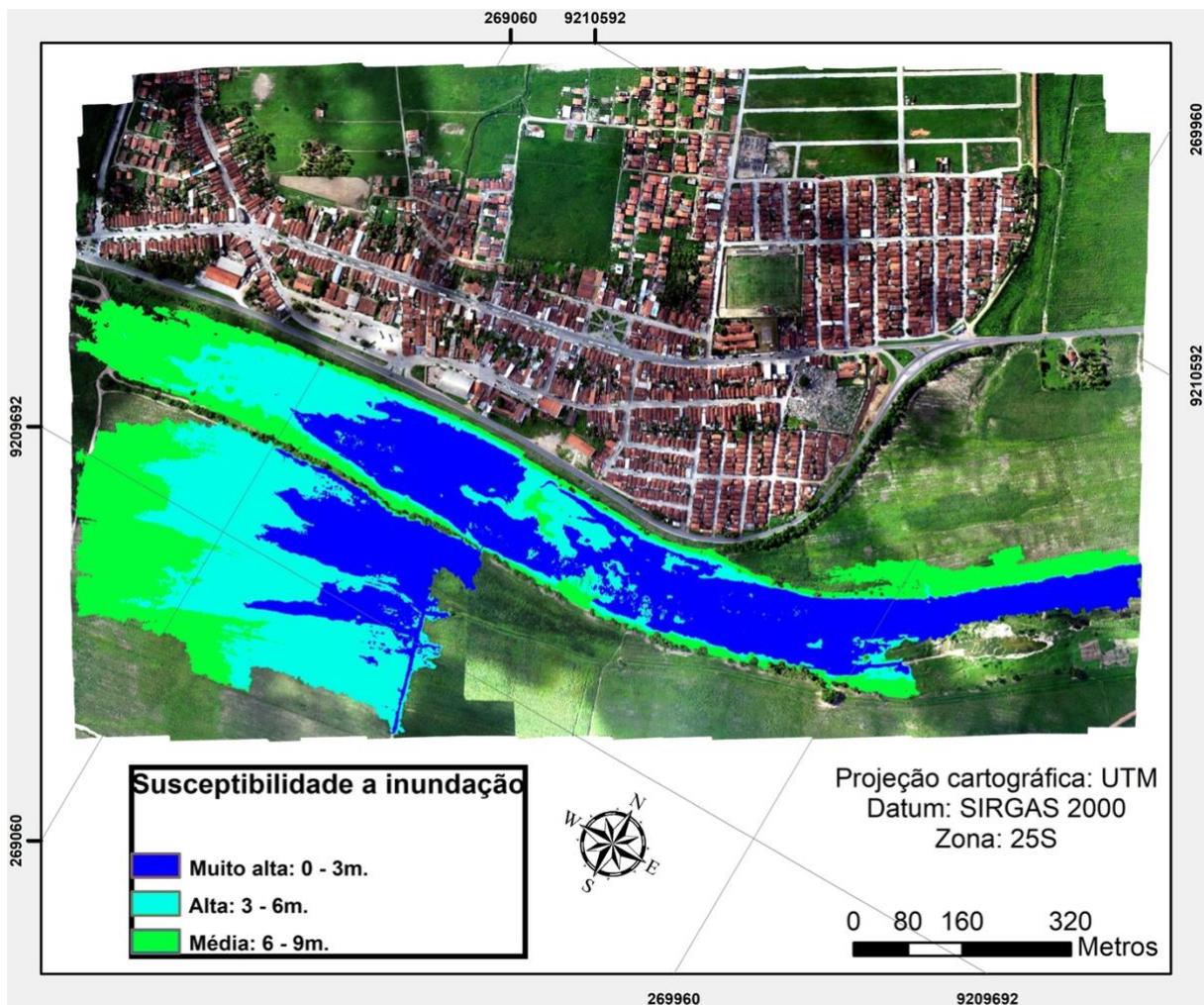


Fonte: autor.

Comparando as Figuras 25 e 26, pode-se perceber a mancha de inundação foi bem menor na Figura 26, onde há o dique, e esta não consegue penetrar na área urbana. Isso comprova a eficiência do dique de Cruz de Espírito Santo como medida estrutural de contenção de inundações. Para uma cheia de até 9m acima do nível do rio Paraíba, o dique oferece proteção à cidade.

Ainda comparando as manchas de inundação das duas situações, também se percebe que estas mudam ligeiramente em regiões que aparentemente não são influenciadas diretamente pelo dique, como a região inferior esquerda das Figuras 25 e 26. Isto ocorre porque o processo de retirada manual do dique no software *Agisoft Photoscan Professional* cria um MDT com diferentes valores de elevação na região central da imagem. Conseqüentemente, as matrizes de direções de drenagem locais e de rede de drenagem mudam. Assim, a matriz HAND também mudará, já que esta é influenciada pelo MDT, LDD e rede de drenagem.

Figura 26 – Mancha de inundação de HAND (com o dique)



Fonte: autor.

Na Figura 25, percebe-se que a região esquerda da mancha urbana não é afetada pela inundação, enquanto a região central inferior da mancha urbana é totalmente inundada. Isto ocorre porque a região da esquerda apresenta uma elevação natural do terreno maior que a região central inferior, tendo cerca de 6m a mais que a área mais baixa. Isto implica que a região central inferior da mancha urbana é a região mais vulnerável da cidade a inundações, por ser simultaneamente a mais baixa e a mais próxima ao rio Paraíba.

Verificando-se os Modelos Digitais de Terreno gerados, observou-se que a geometria do leito maior do rio não segue um padrão contínuo e suave. Há variações relativas bruscas na elevação e uma espécie de um pequeno vale natural nas margens do rio. Isso explica porque nas manchas de inundação há algumas variações bruscas de classes de susceptibilidade de inundação.

Segundo Nobre et al. (2011), a maior parte das falhas do modelo HAND estão associadas a inconsistências do MDE. Dois fatores que diferem este trabalho dos estudos realizados com o HAND até agora podem ter influência em potenciais inconsistências do MDE:

- **Tamanho da área de estudo:** o HAND foi aplicado a uma área de estudo pontual, que considera apenas um pequeno trecho do rio e não a bacia inteira. Logo, há a possibilidade de que regiões nas bordas do MDT escoem para seus canais de drenagem finais por trajetórias que não passam pela área de estudo. Naturalmente, é de se esperar que nessas regiões o valor da matriz HAND seja zero porque simplesmente não há um canal de drenagem conectado a essa região para tomar como referência. Vale ressaltar que o HAND não define os canais de drenagem mais próximos por distâncias euclidianas, e sim, por trajetórias de escoamento. Pode-se observar que a região entre a margem superior do rio Paraíba e a rodovia, na direita das Figuras 25 e 26, é uma porção de terra que intuitivamente seria inundada. No entanto, verificando a matriz de direções de drenagem locais nessa região, percebeu-se que o escoamento ocorre em direção à borda direita do MDE. Logo, o seu ponto de descarga final no rio não está dentro do contorno da imagem, e o resultado gerado pelo HAND é de que a área não inunda. Essa é uma limitação que deve ser considerada para as regiões nas fronteiras dos Modelos Digitais de Elevação em áreas pequenas.
- **Alta resolução do MDT:** por se tratar de um MDT com resolução alta em comparação com os outros estudos já realizados com o HAND, identificou-se a presença de muitas micro-topografias vindas do MDS. Os erros encontrados em um MDE, também chamados de artefatos, são normalmente resolvidos através de algoritmos como o *depression-filling* ou *depression-breaching*. Esses algoritmos de condicionamento hidrológico, no entanto, são normalmente aplicados em Modelos Digitais de Elevação de áreas mais extensas e com menor resolução. Não se pode ter certeza do nível de acurácia desses algoritmos em um trecho pequeno e com alta resolução, como este.

## 5. CONCLUSÃO

O objetivo geral do trabalho foi atingido e pode-se confirmar a eficiência do dique de Cruz do Espírito Santo por meio da comparação das extensões de inundação previstas pelo modelo HAND para as situações com e sem o dique. A seguir, serão feitas as considerações finais e sugestões para pesquisas futuras.

### 5.1 Considerações finais

Este trabalho desenvolveu uma análise de extensão de inundação pontual, aplicada a um único trecho do rio Paraíba. Embora os resultados obtidos tenham sido satisfatórios e os objetivos propostos inicialmente tenham sido atingidos, uma análise de toda a bacia hidrográfica ampliaria o entendimento dos fenômenos de inundação em Cruz do Espírito Santo e resolveria pequenas incoerências encontradas nos mapas de inundação. A gestão pública de controle de risco de inundações deve considerar as bacias hidrográficas como um todo integrado e dinâmico, visto que processos ocorridos em um ponto da bacia podem repercutir em outro.

Além disso, pode-se verificar que o dique de Cruz do Espírito Santo protegeria a cidade da inundação ocorrida em 1985, quando o nível do rio subiu cerca de 9 metros. No entanto, o dique é limitado e não funcionaria se, hipoteticamente, a cota do rio subisse acima do seu limite máximo de proteção. Por esse motivo, medidas não-estruturais de controle de inundações, como sistemas de alerta e mapeamento de áreas mais susceptíveis, devem estar incluídas na gestão pública de riscos de inundações.

O *plugin* TerraHidro, associado ao *software* TerraView, revelou-se uma ferramenta efetiva para a execução de aplicações envolvendo modelagem hidrológica, como extração de redes de drenagem e delimitação de áreas potenciais de inundação. O *software*, que é um produto livre e nacional, pode revelar através da ferramenta HAND áreas mais susceptíveis a inundações sem necessidade de dados como curvas batimétricas, necessárias nos modelos hidrodinâmicos tradicionais.

O HAND não precisa de batimetria porque o canal de drenagem é representado virtualmente pela superfície de água e o modelo é normalizado em relação a esta superfície, de modo que a profundidade e geometria do canal não afetarão a altura de inundação. A

necessidade de poucos dados para delimitação de áreas susceptíveis a inundação por meio do HAND aumenta as oportunidades de mapeamento de inundações em regiões com poucos recursos disponíveis, indicando sua relevância social. Visto que a disponibilidade de dados topográficos é global e a aplicação do HAND é relativamente fácil, o seu uso poderia compor as ferramentas de planejamento e gestão pública de áreas susceptíveis a inundações.

No entanto, o HAND não pode ser considerado um substituto de modelos hidrodinâmicos tradicionais porque este não consegue prever eventos de inundação, já que não considera a dimensão temporal de dados hidrológicos. Assim, a implementação de uma mancha de inundação HAND precisa ser validada com uma cota ou mancha de um evento de inundação real.

Em contraste com toda a bibliografia consultada para a produção deste trabalho, este é o primeiro estudo em que se aplica o HAND para verificar a eficiência de uma estrutura física de controle de inundações. Trata-se, portanto, de uma aplicação do HAND pouco explorada e com grande potencial de ser aplicada por planos públicos de gestão de inundações.

## 5.2 Sugestões para pesquisas futuras

A seguir, são propostas algumas sugestões visando aprofundar a análise desenvolvida nesse estudo:

- **Aumentar a área de estudo:** a área de estudo foi de apenas 90 hectares, ou 0,9 km<sup>2</sup>, devido à dificuldade de se coletar e processar Modelos Digitais de Elevação com a tecnologia e resoluções utilizadas. Assim, sugere-se a aplicação da análise realizada neste estudo a uma área com maiores dimensões, visto que o comportamento do escoamento de água nas áreas adjacentes à área de estudo também é relevante;
- **Utilizar Modelos Digitais de Elevações obtidos com outras tecnologias e com diferentes resoluções:** sugere-se a comparação dos resultados obtidos com simulações HAND feitas a partir de Modelos Digitais de Elevação obtidos a partir de outras tecnologias, como os dados disponibilizados gratuitamente pela missão SRTM; e,
- **Comparar os resultados obtidos com um modelo hidrodinâmico:** sugere-se a comparação das manchas de inundação obtidas com o modelo HAND com as obtidas a partir de modelos hidrodinâmicos tradicionais, como o HEC-RAS.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, G. O. **O Rio Paraíba do Norte**. Editora Universitária/UFPB. Conselho Estadual de Cultura, 166p, João Pessoa, 1997.

BARBOSA, F. A. R. **Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape, PB**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.

BATES, P. D.; DE ROO, A. P. J. *A simple raster-based model for flood inundation simulation*. *Journal of hydrology*, v. 236, n. 1-2, p. 54-77, 2000.

BROUWER, T. *Potential of Twitter derived flood maps: comparing interpolation methods and assesing uncertainties*. Dissertação de Mestrado. University of Twente, Enschede, 2016.

BUARQUE, D. C. et al. **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.

BURROUGH, P.; MCDONNELL, R. *Spatial Information Systems and Geostatistics*. P. Burrough, & R. McDonnell, *Principles of Geographical Information Systems*, v. 333, 1998.

CRUZ, C. B. M. et al. **Avaliação da exatidão planialtimétrica dos modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) obtidos através do LIDAR**. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR*, Curitiba: INPE, v. 2011, p. 5463, 2011.

CUARTAS, L. A. et al. *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.

DJI, Especificações do Phantom 4. Disponível em <<https://www.dji.com/br/phantom-4>>. Acesso em 19 de março de 2013.

ENOMOTO, C. F. **Método para elaboração de mapas de inundação: estudo de caso na bacia do rio Palmital, Paraná**. Dissertação de mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

GODBOUT, L. D. *Error assessment for Height Above the Nearest Drainage inundation mapping*. Dissertação de mestrado. *The University of Texas, Austin*, 2018.

GOERL, R. F.; KOBİYAMA, M. **Considerações sobre as inundações no Brasil**. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005.

GOERL, R. F. et al. **O modelo HAND como ferramenta de mapeamento de áreas propensas a inundar**. Em: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, 2017.

IBGE. **História de Cruz do Espírito Santo – PB**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/cruz-do-espírito-santo/historico>>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2019.

INPE, 2019a. **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/software-desenvolvido-pelo-inpe-simula-a-trajetoria-da-lama-no-colapso-da-barragem-em-brumadinho-mg>>. Acesso em: 13 de março de 2019.

INPE, 2019b. **TerraHidro**. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/projetos/terrahidro>>. Acesso em 18 de março de 2019.

IPCC. *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, Tech. Rep. Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2007.

JHA, A. K.; BLOCH, R.; LAMOND, J. *Cities and flooding: a guide to integrated urban flood risk management for the 21st century*. The World Bank, 2012.

JONKMAN, S. N. *Global perspectives on loss of human life caused by floods. Natural hazards*, v. 34, n. 2, p. 151-175, 2005.

KNOX, J. C. *Large increases in flood magnitude in response to modest changes in climate. Nature*, v. 361, n. 6411, p. 430, 1993.

KOBİYAMA, M. et al. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba: *Organic Trading*, 2006.

KUMMU, M et al. *How close do we live to water? a global analysis of population distance to freshwater bodies*, Plos One 6, 2011.

LIU, Y.Y. et al. *CyberGIS Center Technical Report. In: Conference on CyberGIS and Geospatial Data Science*. 2016. p.7.

MENDONÇA, F. X. **Cruz do Espírito Santo: dados históricos**. Disponível em: <<https://betomendonca.webnode.com.br/news/cruz-do-espírito-santo-dados-historicos/>>. Acesso em: 07 de março de 2019.

MENGUE, V. P. et al. **Utilização do Modelo HAND para mapeamento das áreas mais suscetíveis à inundação no Rio Uruguai**. *Pesquisas em Geociências*, v. 43, n. 1, p. 41-53, 2016.

MERWADE, V. et al. *Uncertainty in flood inundation mapping: current issues and future directions*. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 13, n. 7, p. 608-620, 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.

MOEL, H. et al., *Flood maps in Europe - methods, availability and use*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 289, 2009.

MOMO, M. R. et al. **Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial**. *RBRH [online]*, v. 21, n. 1, p. 200-208, 2016.

MOORE, I. D., et al. *Soil attribute prediction using terrain analysis*. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 443–452, 1993.

MURPHY, P. N. C. et al. *Stream network modelling using LiDAR and photogrammetric Digital Elevation Models: a comparison and field verification*. *Hydrological Processes*, v. 22, p. 1747-1754, 2008.

NETO, M. F.; DA SILVA, P. C. M.; ALCÂNTARA, R. **Impactos sócio-ambientais causados pela construção de barragem: estudo de caso Acauã–PB**. 2016.

NETO, M. S. **Pontos de controle: quando utilizar no mapeamento aéreo com drone?** Disponível em: <<http://blog.droneng.com.br/pontos-de-controle-quando-utilizar-no-mapeamento-aereo-com-drone-2/>> Acesso em: 20 de março de 2019.

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

NOBRE, A. D. et al. *HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent.* *Hydrological Processes*, v. 30, n. 2, p. 320-333, 2016.

NOJI, E. K. *Natural disasters.* *Critical care clinics*, v. 7, n. 2, p. 271-292, 1991.

NOMAN, N.S.; NELSON, E.J.; ZUNDEL, A.K., *A review of automated flood plain delineation from digital terrain models.* *ASCE Journal Water Resources Planning and Management*, 127, 394–402, 2001.

O'CALLAGHAN, J. F; MARK, D. M. *The extraction of drainage networks from digital elevation data.* *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28, 323–344, 1984.

OHL, C. A.; TAPSELL, S. *Flooding and human health: the dangers posed are not always obvious.* 2000.

OPOLOT, E. *Application of remote sensing and geographical information systems in flood management: a review.* *Research journal of applied sciences engineering and technology*, v. 6, n. 10, p. 1884-1894, 2013.

PARAÍBA, Governo do Estado da Paraíba. Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente – SECTMA. **PERH-PB: Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba.** 2006.

PEDROLLO, M. C. R. et al. **Alerta hidrológico da bacia do rio Caí: concepção e implantação do sistema.** 2011.

PEDROSA, A. S.; PEREIRA, A. **Diagnóstico dos factores condicionantes da**

susceptibilidade face ao risco de inundação urbana no concelho de Matosinhos. *Territorium*, n. 13, p. 35-51, 2006.

PÉREZ-MESA, G. J. *Propuesta metodológica para la estimación de zonas de inundación con información escasa por medio de descriptores geomorfológicos derivados de modelos digitales de elevación*. Tese de Doutorado. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2014.

PRIESTNALL, G.; JAAFAR, J.; DUNCAN, A. *Extracting urban features from LiDAR digital surface models*. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24(2), 65-78, 2000.

REFOSCO, J. C. et al. **Mapas de inundação a partir de geoprocessamento e georreferenciamento – O caso de Blumenau (SC)**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13–18 April 2013. Foz do Iguaçu, Brazil: INPE, 4594–4600, 2013.

RENNÓ, C. D et al. *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.

RONDE, J. G.; MULDER, J. P. M.; SPANHOFF, R. *Morphological developments and coastal zone management in the Netherlands*. In: *International Conference on Estuaries and Coasts November*. 2003.

ROSA, R. **Geotecnologias na geografia aplicada**. *Revista do Departamento de Geografia*, São Paulo, v. 16, p.81-90, 2005.

SAVAGE, J. et al. *The impact of Scale on Probabilistic Flood Inundation Maps Using a 2D Hydraulic Model with Uncertain Boundary Conditions*. In *Proceedings of the Second International Conference on Vulnerability, Uncertainty and Risk Analysis and Management (ICVRAM)*, Liverpool, pp. 279-289, 2014.

SHIDAWARA, Masatoshi. *Flood hazard map distribution*. *Urban Water*, v. 1, n. 2, p. 125-129, 1999.

SILVA, L. M. T. **Nas margens do rio Paraíba do Norte**. *CADERNOS DO LOGEPA*, v. 2, n. 2, 2010.

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

TAKEDA, M. M. G. et al. **Caracterização Geoambiental da Bacia Urbana Córrego Roseira - Londrina/PR utilizando sistema de informação geográfica (SIG).** Revista Eletrônica Georaguaia, Barra do Garças, Ed. especial, p.56-76, 2013.

TUCCI, C. E. M. **Gestão das inundações urbanas.** *Global Water Partnership.* Brasília, 2005.

TUCCI, C. E. M. et al. **Inundações urbanas na América do Sul.** Ed. dos Autores, 2003.

UFSC. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010: volume Brasil.** Florianópolis, CEPED, Universidade Federal de Santa Catarina, 92 p. 2012

WARD et al. *Assessing flood risk at the global scale: model setup, results, and sensitivity.* Environmental Research Letters 8: 044019, 2013.

WALESH, S. G. *Urban surface water management.* John Wiley & Sons, 1989.

WERNER, M.G.F. *A comparison of flood extent modelling approaches through constraining uncertainties on gauge data.* *Hydrology and Earth System Sciences* 8: 1141–1152, 2004.

XAVIER, R. A. et al. **Caracterização do regime fluvial da bacia hidrográfica do rio Paraíba–PB.** Revista Tamoios, v. 8, n. 2, 2012.