



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**WILLIAM VIEIRA GOMES**

**ANÁLISE DE ALAGAMENTOS URBANOS A PARTIR DE VEÍCULOS AÉREOS**  
**NÃO-TRIPULADOS: UM ESTUDO DE CASO EM PAU DOS FERROS/RN**

**NATAL/RN**

**2021**

WILLIAM VIEIRA GOMES

ANÁLISE DE ALAGAMENTOS URBANOS A PARTIR DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO-  
TRIPULADOS: UM ESTUDO DE CASO EM PAU DOS FERROS/RN

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro

NATAL/RN

2021

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Gomes, William Vieira.

Análise de alagamentos urbanos a partir de veículos aéreos não-tripulados: um estudo de caso em Pau dos Ferros/RN / William Vieira Gomes. - 2021.

88 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, RN.

Orientador: Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro.

1. Sensoriamento remoto - Dissertação. 2. Depressão Topográfica - Dissertação. 3. Rede de Drenagem - Dissertação. 4. Fotogrametria - Dissertação. I. Amaro, Venerando Eustáquio. II. Título.

RN/UF/BCZM

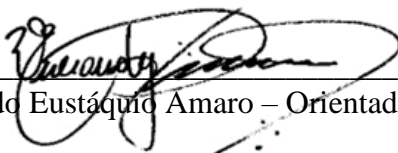
CDU 528.8

WILLIAM VIEIRA GOMES

ANÁLISE DE ALAGAMENTOS URBANOS A PARTIR DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO-  
TRIPULADOS: UM ESTUDO DE CASO EM PAU DOS FERROS/RN

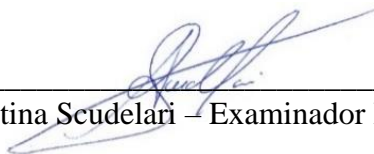
Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação  
em Engenharia Civil, da Universidade Federal do  
Rio Grande do Norte, como requisito final à  
obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**BANCA EXAMINADORA**



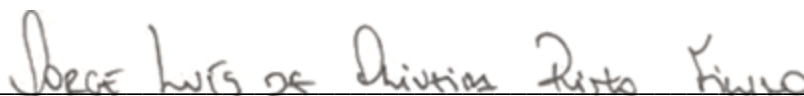
---

Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro – Orientador (UFRN)



---

Prof. Dr. Ada Cristina Scudelari – Examinador Interno (UFRN)



---

Prof. Dr. Jorge Luís de Oliveira Pinto Filho – Examinador Externo (UFERSA)

Natal, 29 de Outubro de 2021.

Aos meus pais, família e amigos, DEDICO.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por me conceder força e perseverança para vencer todos obstáculos encontrados ao longo de meus anos de estudos e, sobretudo, durante realização deste trabalho.

Aos meus pais, Ivanildo Gomes e Maria do Carmo Vieira, por todo o amor, carinho, dedicação, zelo e ensinamentos transmitidos ao longo de toda a minha vida. Obrigado por proporcionar todas as condições para que eu pudesse me tornar quem sou e alcançar os meus objetivos.

A minha namorada, Alaize Tenório, por todo companheirismo, auxílio nas revisões, além de auxílio em todas as etapas da minha vida. Você foi uma peça essencial para eu pudesse continuar acreditando em mim e que tudo daria certo.

A meu orientador Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro, por aceitar conduzir o meu trabalho e pelas valiosas contribuições dadas durante todo o processo de construção desse trabalho.

Ao Programa Acesso à Terra Urbanizada da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, especialmente ao Professor Almir Mariano de Sousa Júnior, por ter disponibilizado os equipamentos necessários para realização dessa pesquisa e por todo apoio em minha trajetória profissional.

A Manoel Mariano, por todo auxílio nas revisões de texto, ideias e por estar sempre solícito a me ajudar.

A Pedro David, Edvar Júnior, Álvaro Felipe e Thallysmara Moura pelo auxílio na realização dos levantamentos e processamento de dados.

Aos amigos e colegas de faculdade, pelos conhecimentos partilhados ao longo destes anos de estudo, por toda a ajuda, disponibilidade e pelo incansável apoio que me deram.

E, por fim, a todos que não foram citados, mas que contribuíram para minha formação pessoal e profissional e no desenvolvimento deste trabalho.

Faça o teu melhor, na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores, para fazer melhor ainda.

Mario Sérgio Cortella

## RESUMO

As cidades brasileiras, dada a rápida expansão urbana e a ausência de infraestrutura quanto aos serviços de saneamento, apresentam elevada suscetibilidade à ocorrência de desastres ambientais, especialmente inundações e alagamentos. Assim, este trabalho teve por objetivo desenvolver um método de análise de alagamentos urbanos com base nos Modelos Digitais de Elevação (MDE) de alta resolução espacial, produzidos através do processamento fotogramétrico das imagens de Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT), associadas ao levantamento estratégico em GNSS. Para tanto, realizou-se pesquisas bibliográficas e de bases cartográfica. Foi realizado o levantamento aerofotogramétrico, possibilitando a verificação da qualidade das imagens e do alinhamento; a produção de três modelos digitais de superfície (MDS), sendo um simplificado, inalterado e corrigido; e a produção de um ortomosaico. Empregou-se também o sensoriamento remoto, possibilitando a delimitação da rede de drenagem, microbacias, depressões topográficas e simulação de alagamentos. Assim, foram identificadas 7 depressões topográficas e modeladas duas galerias de drenagem. Nessas depressões foi constatado a má alocação de instrumentos de drenagem presentes ou até mesmo sua inexistência, impactando no potencial de acumulação das águas pluviais em toda sua extensão. Em outros casos, as águas pluviais acumuladas só passam a escoar para outras localidades após uma lâmina de 30 cm de profundidade. Por fim, verifica-se a necessidade da correção em modelos digitais de elevação para que estes possam representar com mais fidelidade o fluxo das águas pluviais, bem como o potencial de acumulação das depressões topográficas.

**Palavras-chave:** Sensoriamento Remoto. Depressão Topográfica. Rede de Drenagem. Fotogrametria.

## ABSTRACT

Brazilian cities, given the rapid urban expansion and the lack of infrastructure in terms of sanitation services, are highly susceptible to the occurrence of environmental disasters, especially floods and flooding. Thus, this work aimed to develop a method for analyzing urban flooding based on high spatial resolution Digital Elevation Models (DEM) through the photogrammetric processing of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) images, associated with strategic survey in GNSS. For this purpose, bibliographic and cartographic research was carried out. An aerophotogrammetric survey was carried out, enabling the verification of image quality and alignment; the production of three digital surface models (MDS), one being simplified, unchanged and corrected; and the production of an orthomosaic. Remote sensing was also used, enabling a delimitation of the drainage network, micro-basins, topographic depressions and flood simulation. Thus, 7 topographic depressions were identified and two drainage galleries were modeled. In these depressions, the misallocation of existing drainage instruments or even their inexistence was found, impacting no potential for accumulation of rainwater in its entirety. In other cases, the accumulated rainwater only flows to other locations after a depth of 30 cm. Finally, there is a need for correction in digital elevation models so that they represent more faithfully the flow of rainwater, as well as the potential for accumulation of topographic depressions.

**Keywords:** Remote sensing. Topographic depression. Drainage Network. Photogrammetry.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo em Pau dos Ferros/RN.....	27
Figura 2 – Delimitação da Bacia Apodi-Mossoró e seus principais afluentes .....	29
Figura 3 – Caracterização hidrográfica de Pau dos Ferros, evidenciando a rede de drenagem com a identificação do rio Apodi e o riacho Cajazeiras.....	30
Figura 4 – Classificação climática do estado do RN segundo (a) de Alvares et al. (2013) e (b) a reclassificação de Diniz e Pereira (2015) .....	31
Figura 5 – Comparação entre a média pluviométrica mensal baseada na série histórica de 1993-2020 de dados da EMPARN e as médias mensais previstas por Amorim et al. (2020) para a área homogênea Oeste Potiguar .....	32
Figura 6 – Dinâmica espaço-temporal da ocupação urbana em Pau dos Ferros nos anos de 1987 e 2008 .....	34
Figura 7 – Delimitação atual dos bairros e da área urbana de Pau dos Ferros .....	35
Figura 8 – Invasão das habitações nas APPs no Centro de Pau dos Ferros (a) e nos bairros São Benedito (b) e Riacho do Meio (c) .....	36
Figura 9 – Localização do Vertedouro do Açude 25 de Março, onde é possível comprovar a falta de planejamento no crescimento da cidade de Pau dos Ferros.....	37
Figura 10 – Fluxograma metodológico do levantamento e processamento sistemático dos dados.....	38
Figura 11 – VANT utilizado na aquisição das aerofotografias .....	40
Figura 12 – Bases utilizadas para o VANT e para o RTK .....	41
Figura 13 – Coleta de ponto geodésico em um alvo artificial fotoidentificável com rover .....	42
Figura 14 – Pontos empregados no processamento do aerolevanteamento: (a) Representação básica da nuvem de Tie Points, evidenciando os lapsos de informação entre os pontos; (b) Centralização do marcador em um alvo fotoidentificável .....	45
Figura 15 – Recorte espacial da Dense Cloud para: (a) R. Getúlio Vargas e (b) Bevenuto Fialho.....	46
Figura 16 – Filtragem dos pontos acima do nível do terreno .....	47
Figura 17 – Modelos Digitais de Elevação da área de estudo, sendo a) MDS e b) MDT .....	47
Figura 18 – Ortofotomosaico produzido com os GPC distribuídos na área de estudo.....	48
Figura 19 – Vetorização do ambiente urbano na forma de shapefiles.....	50
Figura 20 – Processamento do MDE no recorte espacial da feira livre: (a) MDS inalterado; (b) MDS corrigido com a remoção dos obstáculos acima no nível do terreno nas vias .....	51

Figura 21 – Galeria de drenagem e localidade (região hachurada) onde foi modelada a drenagem e MDE da rua Bevenuto Fialho, (a), (b) e (c), e Getúlio Vargas, (d), (e) e (f), respectivamente.....	52
Figura 22 – (a) Registro de alagamento na R. Bevenuto Fialho no dia 18/02/2017; (b) atualmente; (c) Medição de um ponto de referência .....	54
Figura 23 – (a) Registro de alagamento R. Getúlio Vargas no dia 18/02/2017; (b) atualmente; (c) Medição de um ponto de referência .....	55
Figura 24 – Comparação entre o MDE produzido por um VANT (a) e o obtido pelo SRTM (b), evidenciando uma maior quantidade de informações nos modelos produzidos pelo VANT.....	56
Figura 25 – (a) MDS Simplificado; (b) MDS Corrigido e (c) MDS sem modificação .....	57
Figura 26 – Delimitação das depressões topográfica segundo os modelos utilizados em duas zonas de detalhes: REGIÃO 1 e REGIÃO 2 .....	58
Figura 27 – Rede de drenagem considerando o sentido do fluxo segundo os modelos utilizados nas seguintes localizações: (a) Cruzamento da av. Independência (BR-405) com a r. Antônio Gurjão e a r. Sete de Setembro; (b) r. Praça da Matriz; (c) r. Bevenuto Fialho; (d) rua Hipólito Cassiano.	59
Figura 28 – Área das depressões topográficas do MDS Simplificado, Corrigido e sem alteração nas cores laranja, cinza e azul, respectivamente .....	60
Figura 29 – Volume das depressões topográficas do MDS Simplificado, Corrigido e sem alteração nas cores laranja, cinza e azul, respectivamente.....	61
Figura 30 – Região urbana de Pau dos Ferros: (a) Modelo Digital de Elevação; (b) Rede de fluxo das águas pluviais .....	63
Figura 31 – Gráfico de precipitação acumulada anual e precipitação máxima entre a série histórica de 1993 a 2020.....	65
Figura 32 – Galeria de drenagem das águas pluviais: (a) R. Bevenuto Fialho e (b) R. Getúlio Vargas. Bocas de lobo: (c) R. Getúlio Vargas e (d) Av. Independência (BR-405).....	68
Figura 33 – Simulação de alagamento na Depressão Topográfica 1 com perfil topográfico longitudinal (AB) e transversal (CD) .....	70
Figura 34 – Simulação de alagamento na Depressão Topográfica 3 com perfil topográfico longitudinal (CD) e transversal (AB) .....	71
Figura 35 – Simulação de alagamento na Depressão Topográfica 4 com perfil topográfico longitudinal (AB) e transversal (CD) .....	72

Figura 36 – Delimitação da extensão afetada pela lâmina de alagamento com elevação de 180,68 m.....	74
Figura 37 – a) Alagamento na feira livre (R. Bevenuto Fialho); b) Barracas e ambulantes submetidos ao risco ao alagamento .....	75
Figura 38 – Simulação de alagamento na Depressão Topográfica 5 com perfil topográfico longitudinal (AB) e transversal (CD) .....	76
Figura 39 – Simulação de alagamento na Depressão Topográfica 6 com perfil topográfico longitudinal (AB) e transversal (CD) .....	77
Figura 40 – Delimitação da extensão afetada pela lâmina de alagamento com elevação de 180,98 m.....	78

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Registros noticiados ou presentes na internet da ocorrência de alagamentos em Pau dos Ferros, relacionando-o a precipitação no referido dia do acontecimento.....	66
Quadro 2 – Caracterização dos pontos de alagamento no centro da cidade de Pau dos Ferros .	67

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Dados de entrada para o plano de voo da área de estudo .....	40
Tabela 2 – Coordenadas dos pontos de controle coletados e processados .....	42
Tabela 3 – Precisão e tempo gasto nas etapas de processamento do aerolevanteamento .....	43
Tabela 4 – Erros antes e após a utilização de pontos de controle (GPC) para correção posicional.....	49

## LISTA DE ABREVIATURAS

Av. Avenida

R. Rua

## LISTA DE SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
APP	Área de Preservação Permanente
CE	Ceará
CPRM	Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais
DOL	Distúrbios Ondulatórios do Leste
EEP	Evento Extremo de Precipitação
EM-DAT	<i>Emergency Events Database</i>
EMPARN	Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte
FDBS	Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPC	<i>Ground Point Control</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSD	Ground Sample Distance
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFRN	Instituto Federal do Rio Grande do Norte
IGARN	Instituto de Gestão das Águas do Estado do Rio Grande do Norte
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
PA	Pará
PB	Paraíba
PISF	Projeto de Integração do Rio São Francisco
PPP	Posicionamento de Ponto Preciso
RN	Rio Grande do Norte
RMSE	Root Mean Squared Error
RS	Rio Grande do Sul
RTK	Real Time Kinematic

SciELO	<i>Scientific Electronic Library Online</i>
SEMARH	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIRGAS	Sistema de Referência Geodésico para as Américas
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
UERN	Universidade Estadual do Rio Grande do Norte
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
WGS	<i>World Geodetic System</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	19
<b>1.1 Objetivos</b> .....	24
<b>2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	26
<b>2.1 Localização da área de estudo</b> .....	26
<b>2.2 Aspectos fisiográficos</b> .....	27
2.2.1 <i>Contexto geomorfológico e pedológico</i> .....	28
2.2.2 <i>Caracterização hidrográfica</i> .....	28
2.2.3 <i>Aspectos climáticos</i> .....	30
<b>2.3 Contexto socioeconômico e histórico da urbanização de Pau dos Ferros/RN</b> .....	32
2.3.1 <i>Problemas no desenvolvimento urbano de Pau dos Ferros/RN</i> .....	35
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	38
<b>3.1 Levantamento bibliográfico e cartográfico</b> .....	39
<b>3.2 Levantamento aerofotogramétrico</b> .....	39
<b>3.3 Processamento digital de imagens</b> .....	43
<b>3.4 Elaboração de dados em Sistema de Informações Geográficas (SIG)</b> .....	49
3.4.1 <i>Produção dos Modelos Digitais de Elevação</i> .....	49
3.4.2 <i>Delimitação das microbacias e rede de drenagem</i> .....	53
3.4.3 <i>Delimitação das depressões topográficas</i> .....	53
3.4.4 <i>Simulação de alagamentos</i> .....	54
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	56
<b>4.1 Avaliação dos modelos digitais de elevação</b> .....	56
<b>4.2 Eventos extremos de precipitação e alagamentos na área de estudo</b> .....	62
<b>4.3 Simulação dos alagamentos</b> .....	68
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	80
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	82

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento desenfreado e desordenado das cidades dos países em desenvolvimento e os problemas socioeconômicos e ambientais em decorrência desse processo é um tema amplamente discutido (AMORIM FILHO, 1984; GROSTEIN, 2001; MARICATO, 2003; STAMM et al., 2012). No Brasil, esse processo foi iniciado no século XIX, mas se tornou mais efetivo a partir da segunda metade do século XX com a migração de boa parte da população do campo para a cidade através do êxodo rural (GRAHAM; HOLANDA FILHO, 1973).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2012), no ano de 1950 a quantidade de pessoas que residiam nos centros urbanos correspondia a 36,16% da população. Já em 2010 esse valor teve um salto para 84,36%, além disso, soma-se a esse efeito o aumento da densidade demográfica de 6,1 para 22,43 hab/km<sup>2</sup> o que tende a agravar ainda mais a problemática da ocupação do espaço urbano no Brasil (IBGE, 2012).

Para Lima et al. (2019), a elevada densidade populacional combinada com o grande número de áreas construídas faz com que as cidades se tornem vulneráveis a problemas de cunho urbanístico, sendo a modificação no uso e cobertura do solo um dos principais motivos dessa fragilidade (CORREIA et al., 2015; PILLA; GHARBIA; LYONS, 2019). Dessa forma, devido à ausência de políticas públicas voltadas para resolução dessa problemática, o espaço urbano das cidades brasileiras passou a apresentar em toda sua extensão uma série de impactos ambientais urbanos (PASQUALOTTO; SENA, 2018).

Esses impactos, por sua vez, implicam na qualidade de vida cidadina, pois se associam a ocorrência de enchentes, erosões, contaminações de corpos hídricos, diminuição de áreas verdes e permeáveis (GUERRA; CUNHA, 2001). Essas ações lesivas ao meio ambiente no desenvolvimento dos ambientes urbanos estão cada vez mais presente e visível no cotidiano das cidades brasileiras (GIARETTA, FERNANDES, PHILIPPI JR, 2012).

Com o crescimento das aglomerações urbanas em uma velocidade superior a implantação da infraestrutura básica e sem políticas norteadoras do uso e ocupação do solo, sobretudo nas regiões periféricas das cidades, as consequências dessas fragilidades urbanas são desastrosas (GOMEZ-IBAÑEZ; NUNEZ, 2009; GRANDE et al., 2014). Para Tornquist e Silva (2019), as mudanças antrópicas induzidas por essa expansão promovem reduções significativas nas áreas florestadas, além de provocar a erosão do solo ou a perda de sua capacidade de infiltração a qual impacta diretamente na capacidade resiliente do ambiente (OTHOW; GEBRE; GEMEDA, 2017).

A degradação dos solos, seja para o crescimento das cidades ou para o desenvolvimento da agricultura, modifica o ciclo hidrológico e pode aumentar a probabilidade de sinistros na ocorrência de eventos climáticos extremos (SANTOS; RUFINO; BARROS FILHO, 2017). Estes podem se expressar de diversas formas, sendo as mais comuns por meio de enchentes, enxurradas, deslizamentos de massas de terra, alagamentos, ondas de calor, secas prolongadas, tufões e tornados (CORREIA; RIBEIRO; BAPTISTA, 2015).

Conforme relata a Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, devido às mudanças ambientais que o planeta vem experimentando a partir da segunda metade no século XX, a frequência e a intensidade dos eventos climáticos vêm aumentando e impactando cada vez mais a população (FBDS, 2010). De acordo com o *Emergency Events Database* (EM-DAT), no ano de 2018 houve 315 eventos climáticos extremos no mundo que afetaram 68,5 milhões de pessoas e provocaram 132 bilhões de dólares em danos socioeconômicos. A maior parte desses acontecimentos é referente às inundações que acometem alguns países asiáticos, sobretudo a Índia e o Japão (EM-DAT, 2018).

O Brasil também vivencia esse cenário, de modo que entre os anos 2000 e 2018 ocorreram 65 enchentes, registrados 88% das fatalidades (2.435 vítimas) em desastres naturais. A seca, no entanto, afetou 33.062.000 pessoas, sendo o evento extremo que mais impactou os brasileiros, enquadrando a maior parte da região Nordeste em altíssimo risco de desastres ambientais (EM-DAT, 2021).

Outro impacto de grande frequência no Brasil são os alagamentos nas áreas urbanas que ocorrem devido às chuvas intensas, má gestão ambiental das bacias e a ocupação desordenada de habitações. Para Marengo (2008), o Brasil é muito vulnerável a Eventos Extremos de Precipitação (EEP), sobretudo em cenários futuros com ausência de políticas norteadoras para o crescimento sustentável das cidades.

Segundo Pott e Estrela (2017), o alagamento é um fenômeno que pode ser compreendido como a consequência imediata da alta concentração de águas pluviais impossibilitada de ser absorvida pelo solo, seja porque este já se encontrar saturado ou devido ao escoamento natural ser ineficiente ou interrompido.

Em áreas urbanas excessivamente impermeabilizadas, o fluxo de água segue para os baixios e rios com vazão e velocidade consideráveis e que podem superar a capacidade de escoamento dos componentes de drenagem, caso estejam presentes. Esses transtornos ainda se

acentuam pelo descarte inadequado de resíduos sólidos nas vias urbanas, pois a capacidade de condução hidráulica efetiva é comprometida pela obstrução do fluxo das águas pluviais (NEVES; TUCCI, 2011; BLUMENSAAT et al., 2012; LIMA et al., 2019).

A ocorrência de alagamentos e os prejuízos decorrentes desse fenômeno aumentaram substancialmente em cidades de médio porte nos últimos anos. A urbanização desordenada, o não cumprimento legal do Plano Diretor Municipal (quando existente) e a ineficiência dos dispositivos de drenagem no manejo das águas pluviais são tidos como causas chave dessa problemática (NEVES; TUCCI, 2011).

Os EEP, por sua vez, são acontecimentos em que uma intensa chuva provoca inúmeros transtornos a infraestrutura urbana, tais como alagamentos, inundações, subsidência da estrutura viária, além de propiciar o movimento de massa em encostas. Embora não seja frequente, as últimas décadas evidenciaram o aumento de suas ocorrências em todo o globo devidas às mudanças climáticas (AMORIM et al., 2019; PEREIRA; NUNES, 2018).

A impermeabilização do solo por meio do avanço urbano ainda intensifica os efeitos danosos de um EEP, pois ocasiona o aumento do fluxo superficial e os alagamentos se tornam cada vez mais frequentes. Dessa forma, além dos prejuízos ambientais esses acontecimentos também são acompanhados por perdas socioeconômicas e sujeição da população ao risco de alagamentos e inundações (CORREIA; RIBEIRO; BAPTISTA, 2015).

Embora os impactos ambientais e problemas urbanos já mencionados sejam típicos e mais estudados nas grandes cidades do país, essa também se abrange às cidades pequenas e médias como é o caso do município de Pau dos Ferros, localizado na mesorregião do Oeste do Estado do Rio Grande do Norte (RN). Possuindo 27.745 habitantes, dos quais 92,03% são residentes na área urbana (IBGE, 2010), nos últimos anos Pau dos Ferros se tornou um importante polo regional de comércio, saúde e educação para pelos menos outros 35 municípios em sua zona de influência, englobando aproximadamente 174.019 pessoas que fazem uso de seus serviços (DANTAS; CLEMENTINO; FRANÇA, 2015; BEZERRA, 2016).

Para atender o crescimento acelerado da cidade e a consequente ampliação do uso do solo, Pau dos Ferros passou, nas duas últimas décadas, por uma expansão urbana carente de políticas básicas de planejamento urbano e de ampliação e revitalização de sua infraestrutura básica. Isso fez com que nos períodos chuvosos, com constantes alagamentos, atingissem as regiões centrais

da cidade colocando em risco comércios, instalações públicas e a saúde da população dessa localidade.

Mesmo que submetido a condições drásticas de seca, em que chove apenas 8,72% dos dias do ano (EMPARN, 2020), essa localidade vem experimentando nos últimos anos uma série de problemas relativos à falta de infraestrutura e a deficiência dos componentes básicos do saneamento ambiental, em decorrência do crescente processo de expansão urbana que a cidade vem experimentando.

No tocante aos componentes de saneamento, os sistemas de drenagem urbana, em especial, só demonstram fragilidade através da ocorrência de alagamentos durante os curtos períodos chuvosos do ano. Costa, Lima e Silva (2013) relatam que a sazonalidade dessas ocorrências em Pau dos Ferros é um dos fatores que possibilitam a ocupação com habitações em áreas de risco, como nas depressões topográficas e em Áreas de Preservação Ambiental (APPs) do rio Apodi mesmo, sem a devida solução dessa problemática.

Uma forma de reverter esse quadro é relatada Tucci, Porto e Barros (1995) que sugerem a implementação de um sistema urbano de drenagem adequado que considere as características morfométricas do terreno, o arranjo urbano, o uso e ocupação do solo, assim como da probabilidade de ocorrência de EEP na análise de séries históricas de precipitação.

As características ambientais podem ser analisadas, de modo preciso e acurado, por meio da aplicação das geotecnologias. Tais técnicas são baseadas em métodos matemáticos e computacionais viabilizam a produção de modelagens hidrológicas que são imprescindíveis para a análise dos riscos ambientais (BARBOSA; OLIVEIRA; ALVES, 2011; MANTOVANI; BACANI, 2018; LIMA et al., 2019).

Essas modelagens relacionam as características físicas do terreno, como a planialtimetria, taxa de permeabilidade e tipo dos solos, e dados de precipitação na bacia hidrográfica, por meio de equações matemáticas de fluxo (conservação de massa e de quantidade de movimento). Sendo assim, é possível identificar e interpretar os problemas localizados de alagamento urbano e os conduzir para uma solução planejada e que considere os efeitos das mudanças antrópicas (TUCCI, 1998).

Ainda no contexto das geotecnologias aplicadas, as características físicas do local a ser modelado podem ser espacializadas por meio do uso de imagens de sensoriamento remoto e Modelos Digitais de Elevação (MDE). Tais dados permitem a representação do relevo da superfície

terrestre em escala regional (HIRT; FILMER; FEATHERSTONE, 2010) através de uma matriz regular (x, y) e/ou pixels com dimensões definidas (resolução espacial) (HEIDEMANN, 2018).

A partir do MDE podem ser obtidos diversos produtos que podem ser inseridos nas modelagens hidrológicas ou na quantificação dos riscos ambientais, como altitudes, declividades e orientações de morros e vales. Ao se integrarem, essas variáveis podem caracterizar o padrão do escoamento das águas pluviais ou fluviais pelo terreno e evidenciar as depressões topográficas mais atingidas pela ocorrência de alagamentos. Entretanto, a resolução espacial impacta diretamente na escala de trabalho e na qualidade dos modelos hidrológicos (LIMA et al., 2019) sobretudo em áreas urbanas, onde a utilização de MDE disponíveis gratuitamente causam perdas de informações quanto à representação altimétrica no pixel e, assim, em resultados imprecisos quanto à localização e a delimitação da área afetada.

Costa, Lima e Silva (2013) realizaram para a cidade de Pau dos Ferros uma carta de risco a inundação através do MDE obtido por meio de imagens do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Entretanto, a resolução espacial considerada no modelo é inferior da proposta por Leitão et al. (2016), ou seja, inadequada para as análises de alagamentos em contextos urbanos. Além disso, a escala de trabalho adotada pelos autores não permite a localização com precisão dos pontos focais e a dimensão da problemática.

Diante disso, novas metodologias vêm se mostrando cada vez mais promissoras na obtenção de dados de sensoriamento remoto com uma maior precisão e acurácia para a produção de modelos matemáticos e produtos cartográficos (MCCLURE et al., 2016). Destacam-se nesse contexto os receptores *Global Navigation Satellite System* (GNSS), os *Light Detection And Ranging* (LiDAR) terrestres e os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), os quais podem fornecer dados para realização de MDE com resoluções espaciais compatíveis com o problema do alagamento urbano (LIMA et al., 2019; AGUIAR et al., 2019).

Os VANTs são definidos como aeronaves projetadas para execução de voos sem a necessidade de um piloto a bordo (ANAC, 2017). Na grande maioria das vezes, são guiados por um sistema integrado de GPS acoplados a câmeras digitais para imageamento de alta resolução. Dessa forma, por meio das correções aerofotogramétricas é possível utilizar os produtos obtidos com o VANT na representação detalhada das feições do relevo e dos elementos urbanos, como edificações e infraestruturas públicas. Eles ainda se destacam pelo alto desempenho, precisão e acurácia, sobretudo quando corrigidos com pontos de apoio no terreno baseados em levantamentos

GNSS. Nesse caso, a resolução espacial do MDE oriunda desses procedimentos é de ordem centimétrica, podendo ser até 99,8% melhor à dos produtos disponibilizados gratuitamente no mercado (BUFFON; SAMPAIO; PAZ, 2018; PEDREIRA; OLIVEIRA; SANTOS, 2020; SILVA et al., 2020).

O processamento das imagens do VANT possibilita a obtenção de um MDE que representa não só as feições do terreno, mas também das que se projetam acima dele, como edificações, carros, árvores e calçadas. A superfície tridimensional gerada no processamento fotogramétrico das imagens constitui o relevo do Modelo Digital de Superfície (MDS). A remoção dessas feições para obtenção do relevo aproximado apenas do terreno é feita por meio da filtragem e interpolação dos dados, gerando o Modelo Digital de Terreno (MDT).

De acordo com Feng et al. (2015), a utilização do MDS nas modelagens hidrológicas possibilitam respostas mais realistas, pois assim os objetos não pertencentes ao relevo próprio do terreno se configuram como obstáculos para o fluxo superficial e modificam a dinâmica das águas pluviais. O MDT, por outro lado, auxilia na análise preliminar do fluxo natural, evidenciando os impactos as modificações da ocupação antrópica na formação de depressões topográficas (LIMA, 2019; LIMA et al., 2019).

Com base no exposto, devido a carência de dados científicos sobre a ocorrência dos alagamentos e seus impactos na cidade de Pau dos Ferros, o presente trabalho avaliou o perigo ao alagamento com base em um MDE de alta resolução produzido por um VANT, no histórico de precipitação e em observações in loco, identificando as áreas mais afetadas por esse fenômeno e propondo soluções de engenharia e de planejamento urbano para minimização essa problemática.

## **1.1 Objetivos**

O objetivo geral é analisar a ocorrência dos alagamentos em um recorte espacial localizado na região central da cidade de Pau dos Ferros por meio de técnicas de Geoprocessamento.

Para se contemplar o desenvolvimento deste estudo, faz-se necessário a realização dos seguintes objetivos específicos:

1. Mapear a área de estudo através de um levantamento aerofotogramétrico;
2. Comparar o Modelo Digital de Superfície Simplificado, Corrigido e não alterado em relação à rede de drenagem e a delimitação de depressões topográficas;

3. Comparar o fluxo superficial com a disposição de instrumentos de drenagem verificada *in loco*;
4. Simular a elevação da lâmina de alagamento nas depressões topográficas;
5. Verificar as áreas mais afetadas na ocorrência de um EEP noticiado.

## **2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

Neste capítulo serão apresentadas a delimitação do local de estudo e as caracterizações necessárias para o entendimento do crescimento da cidade de Pau dos Ferros e a ocorrência de alagamentos relacionados ao processo de urbanização. Para tanto, é necessária a compreensão de aspectos geológicos, geomorfológicos, climatológicos e hidrográficos na localidade, a fim de contextualizar a referida problemática.

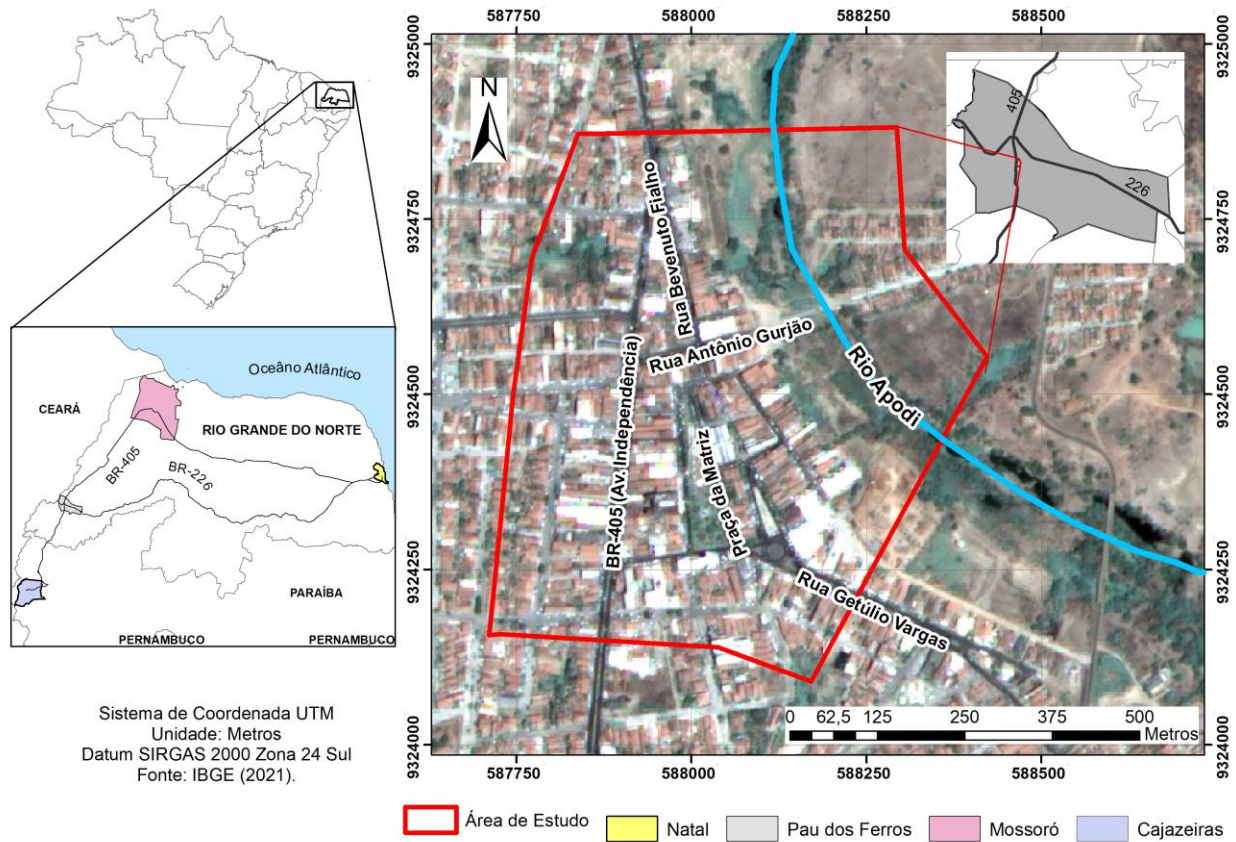
### **2.1 Localização da área de estudo**

O município de Pau dos Ferros dista 392 km de Natal, capital do RN, e está localizado em região fronteiriça aos estados da Paraíba (PB) e Ceará (CE). Ele possui uma população de 30.600 habitantes com uma densidade de 117,7 hab/km<sup>2</sup> (IBGE, 2021) e se estende por área de aproximadamente 260 km<sup>2</sup>, sendo 9,765 km<sup>2</sup> referente à área urbana, conforme mostrado na Figura 1 (EMBRAPA, 2015; PAU DOS FERROS, 2017).

Inserido nesse ambiente, o recorte espacial da área de estudo com 0,5 km<sup>2</sup> corresponde à porção centro-leste da cidade de Pau dos Ferros e compreende o bairro Centro e uma parcela dos bairros São Geraldo e São Benedito, onde se localiza a maior parte dos problemas de cunho urbanísticos da cidade. Nestes bairros funcionam grande parte dos estabelecimentos da cidade, como supermercados, bancos, *shopping centers*, lojas e a feira livre. Além disso, essa região é interceptada pelo rio Apodi que, por ser intermitente, propiciou uma ocupação carente de planejamento do uso da terra no centro da cidade ao longo de seu leito mesmo em áreas de preservação permanente (COSTA; LIMA; SILVA, 2013; SILVA *et al.*, 2019).

As ruas Getúlio Vargas, 15 de Novembro, Bevenuto Fialho e Praça da Matriz são as mais utilizadas da área de estudo para as atividades comerciais. A Rua Antônio Gurjão liga a cidade a rodovia RN-177, além de ser utilizada diariamente para o acesso da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), e, posteriormente, liga-se a BR-226 que é uma das principais rodovias de acesso a Natal/RN.

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo em Pau dos Ferros/RN



O trânsito diário é intenso por ser uma das principais vias de acesso à rodovia BR-405 que interliga Pau do Ferros aos municípios de Cajazeiras/PB a Mossoró/RN, dois importantes polos comerciais e industriais da região oeste potiguar.

## 2.2 Aspectos fisiográficos

De acordo com Tricart (1965), para a compreensão do espaço geográfico é fundamental a descrição de suas características climáticas, geomorfologias e geológicas, sendo esta desenvolvida através de suas feições litológicas e morfogênicas. Através dessas caracterizações é possível entender a delimitação de áreas de risco ambientais ou socioeconômicos no processo de uso e ocupação do solo devido à expansão urbana (PEDROSA, 2014).

### *2.2.1 Contexto geomorfológico e pedológico*

No contexto geomorfológico, a referida região está inserida na Província Borborema, sendo composta pelas unidades litográficas Jaguaretama (PP2j), Itaporanga (N34a) e Caicó (PP2cai) e Pendência (K1pn) (CPRM, 2021). Esses embasamentos possuem como características principais as elevações residuais e sua resistência aos processos erosivos. Além disso, de acordo com CPRM (2017), a pedologia do município de Pau dos Ferros é composta por: neossolos litólicos, luvisolos crômicos e argissolos vermelho-amarelo (CPRM, 2017).

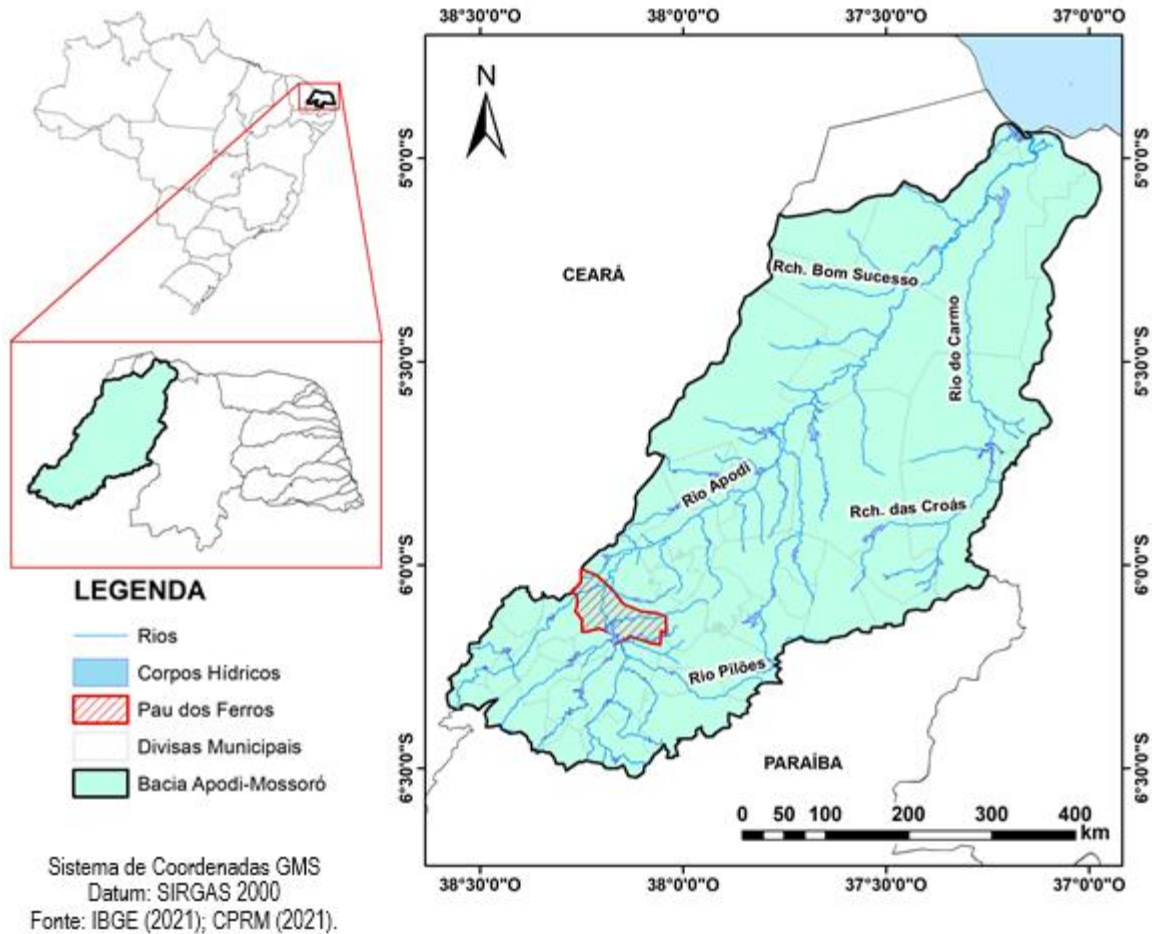
Além disso, a geomorfologia é constituída em sua maior parcela pela depressão sertaneja, apresentando pediplanações monótonas recortado pelo vale do rio Apodi. O relevo preponderante é suave-ondulado (3 – 8% de inclinação), mas no extremo oeste do município estão as serras de Serrinha dos Pintos e Antônio Martins, com feições de Aplainamentos Residuais do Domo da Borborema, de altitudes superiores a 350 m e relevo ondulado (8 – 20%) ou fortemente ondulado (20 – 45%), conforme a classificação da CPRM (2017) e IBGE (2021).

### *2.2.2 Caracterização hidrográfica*

O município de Pau dos Ferros está inserido na Bacia Apodi-Mossoró, que compreende 48 municípios do Oeste Potiguar, com área de 14.276 km<sup>2</sup> ou cerca de 26,8% do RN (SEMARH, 2021). De acordo com o Instituto de Gestão de Águas do Rio Grande do Norte (IGARN), trata-se da maior bacia genuinamente potiguar e engloba 10,7% das águas acumuladas no RN, conforme mostra a Figura 2 (IGARN, 2021).

O principal tributário da bacia é o rio Apodi cuja importância hídrica é ímpar para a comunidade ribeirinha que usa suas águas para as inúmeras atividades agrícolas e pecuárias desenvolvidas na região (JUSTO; SANTOS; SOUZA, 2016). Ele nasce em Luís Gomes/RN e possui exultório entre os municípios de Grossos/RN e Areia Branca/RN ao desaguar no mar.

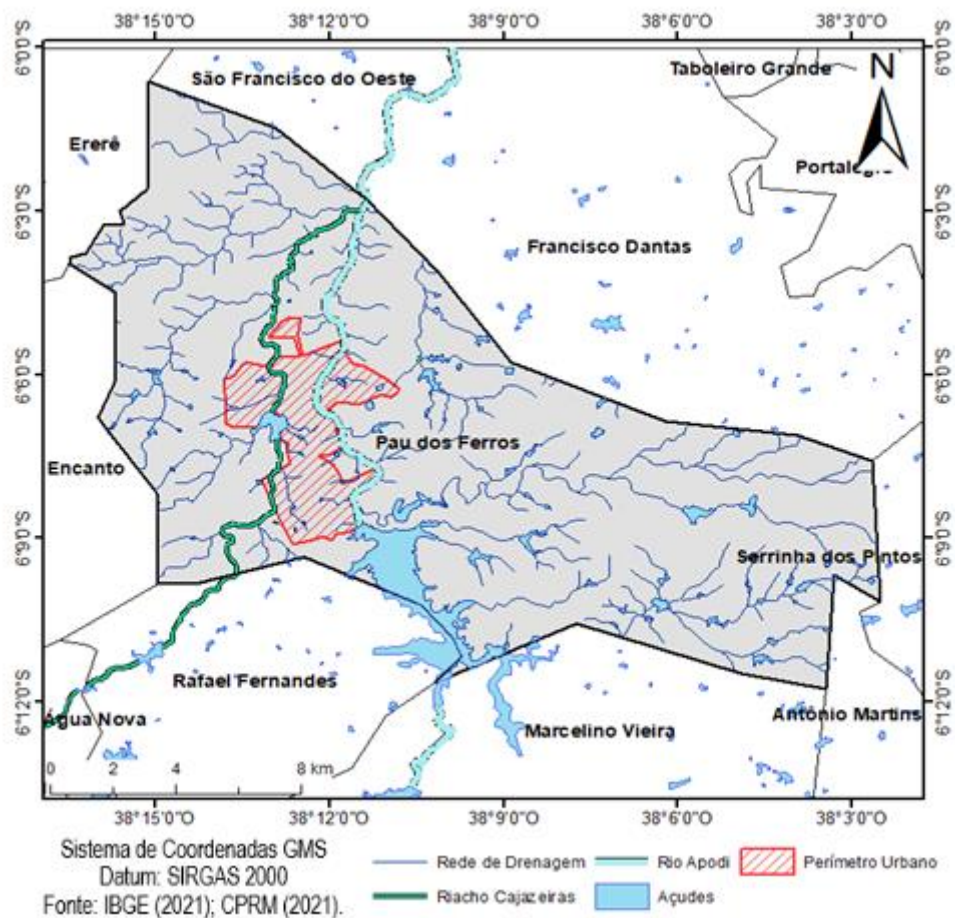
Figura 2 – Delimitação da Bacia Apodi-Mossoró e seus principais afluentes



Devido a sua importância socioeconômica e por ser intermitente, o rio Apodi foi incluído no Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF). Através do Eixo Norte as águas entrarão no RN pelo Trecho IV, passando pelos municípios de Major Sales/RN), José da Penha/RN e chegarão no Açude de Pau dos Ferros. Após isso, escoarão pela calha do rio Apodi promovendo sua perenização (BRASIL, 2004).

Em seu percurso de Sul para Norte, o rio Apodi subdivide a cidade de Pau dos Ferros, onde a oeste se encontra o bairro Centro e a leste o São Geraldo. Ela também é atravessada pelo riacho Cajazeiras, que entra pela fronteira com o município de Rafael Fernandes e deságua no Açude 25 de Março, cujas águas que extravasam pelo vertedouro são orientadas para o leste da cidade até se encontrarem com o rio Apodi nas proximidades da divisa com Francisco Dantas/RN (Figura 3).

Figura 3 – Caracterização hidrográfica de Pau dos Ferros, evidenciando a rede de drenagem com a identificação do rio Apodi e o riacho Cajazeiras



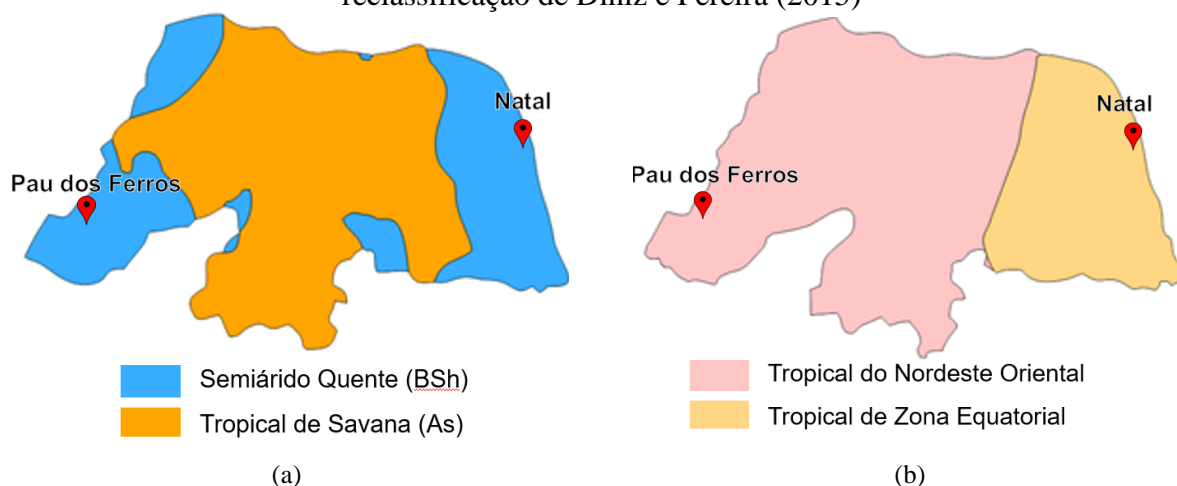
### 2.2.3 Aspectos climáticos

O RN sofre a ação de diferentes mecanismos climáticos que resultam em heterogênea distribuição espacial e temporal das chuvas, com longos períodos de seca, mas também com precipitações intensas (OLIVEIRA *et al.*, 2013; COSTA *et al.*, 2015). As precipitações anuais em seu território podem variar de 300 a 2.000 mm na região Seridó e no Litoral, respectivamente (AMORIM *et al.*, 2019).

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o mecanismo propiciador das chuvas predominantes entre os meses de fevereiro a abril, igualmente responsável pela quadra chuvosa do Oeste e do Seridó. A partir do mês de maio, a ação dos Distúrbios Ondulatórios do Leste (DOL) é responsável pela maior parte das chuvas, sobretudo no litoral potiguar, onde comumente é possível verificar níveis de precipitação acumulada de 210 mm somente no mês de junho juntos com a ocorrência de EEP (OLIVEIRA *et al.*, 2013; GOMES *et al.*, 2015; AMORIM *et al.*, 2020).

O RN possui duas tipologias climáticas de acordo com a classificação de *Köppen*, sendo Tropical de Savana (*As*) para as mesorregiões do Oeste, Agreste e Leste Potiguar, e Semiárido Quente (*BSh*) para praticamente toda porção Central, englobando também parte do Oeste e do Agreste Potiguar e correspondendo a 61,2 % do território Potiguar (ALVARES *et al.*, 2013, Figura 4 – a). Diniz e Pereira (2015) reclassificaram o clima do RN em Tropical do Nordeste Oriental para as Mesorregiões Oeste, Central e uma parcela do Agreste Potiguar e em Tropical de Zona Equatorial para as demais faixas territoriais (Figura 4 – b).

Figura 4 – Classificação climática do estado do RN segundo (a) de Alvares et al. (2013) e (b) a reclassificação de Diniz e Pereira (2015)



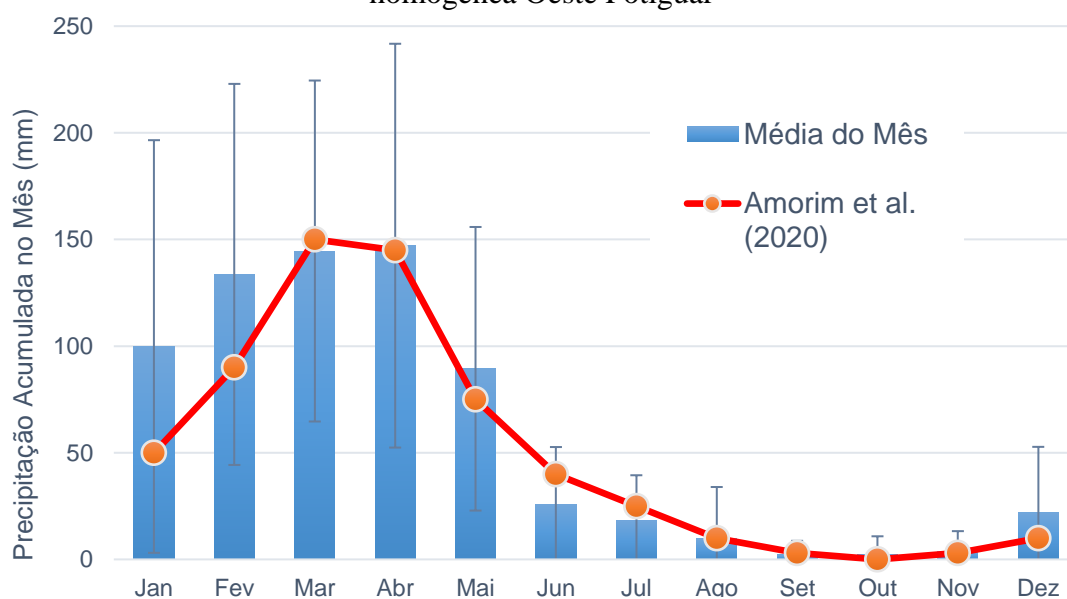
Fonte: Adaptado de Alvares et al. (2013); Diniz e Pereira (2015).

Por meio de análises estatísticas multivariadas em série temporal compreendida entre os anos 1900 e 2014, Amorim *et al.* (2020) verificaram que o RN pode ser dividido em três áreas climáticas homogêneas, sendo estas o Oeste, o Seridó (central) e o Litoral. As médias pluviométricas acumuladas anuais para cada um foi de 561 mm, 367 mm e 772 mm, respectivamente.

Com clima *As* pela classificação de Alvares *et al.* (2013) e Tropical do Nordeste Oriental por Diniz e Pereira (2015), o município de Pau dos Ferros possui uma média de precipitação anual de  $698,3 \pm 107,5$  mm, obtida através de uma distribuição *t-student* com 95% de confiança, com base nos dados da EMPARN entre os anos de 1993 a 2020 com 8,2% de falhas. É importante ressaltar que na série histórica considerada o extremo inferior (590,8 mm) ainda é maior que o valor médio de precipitação para área homogênea Oeste delimitada por Amorim *et al.* (2020).

No entanto, os mesmos autores ainda concordam com os dados da EMPARN quanto a quadra chuvosa, sendo estes de janeiro a maio, conforme ilustrado na Figura 5. Para Gurgel e Medeiros (2018), a quadra chuvosa de Pau dos Ferros é compreendida entre os meses de fevereiro e maio, enquanto os meses mais secos são agosto, setembro, outubro e novembro cuja precipitação acumulada é de apenas 3% da média pluviométrica anual.

Figura 5 – Comparação entre a média pluviométrica mensal baseada na série histórica de 1993-2020 de dados da EMPARN e as médias mensais previstas por Amorim et al. (2020) para a área homogênea Oeste Potiguar



Fonte: Adaptado de EMPARN (2020); Amorim *et al.* (2020).

De acordo com os dados da estação meteorológica da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA) *Campus* Pau dos Ferros entre 23/10/2018 (data de instalação) e 02/07/2019 (último dado disponibilizado), a temperatura média de Pau dos Ferros foi de 28,77 °C, com máxima de 32,33°C e mínima de 25,04°C.

### 2.3 Contexto socioeconômico e histórico da urbanização de Pau dos Ferros/RN

De acordo com Stamm *et al.* (2013), a distância aos maiores centros urbanos do país fez com que houvesse um processo de concentração demográfica e econômica nas cidades de médio porte, conferindo a elas uma posição estratégica e um poder polarizador em relação aos municípios que a rodeiam.

Nessa hierarquia urbana, o município de Pau dos Ferros se desenvolveu entre antigas capitais regionais: Juazeiro do Norte/CE, Mossoró/RN e Campina Grande/PB, exercendo função de cidade média ao ganhar posição de destaque na Microrregião do Alto Oeste Potiguar através de sua relação comercial com pelo menos outras 40 cidades próximas (DANTAS; CLEMENTINO; FRANÇA, 2015).

Além da população residente, Pau dos Ferros conta também com a migração pendular e temporária de médio prazo dos municípios circunvizinhos dos estados da PB e do CE que fazem com que Pau dos Ferros englobe um total de 174.019 usuários de seus serviços diários ou semanalmente (DANTAS; CLEMENTINO; FRANÇA, 2015; BEZERRA, 2016).

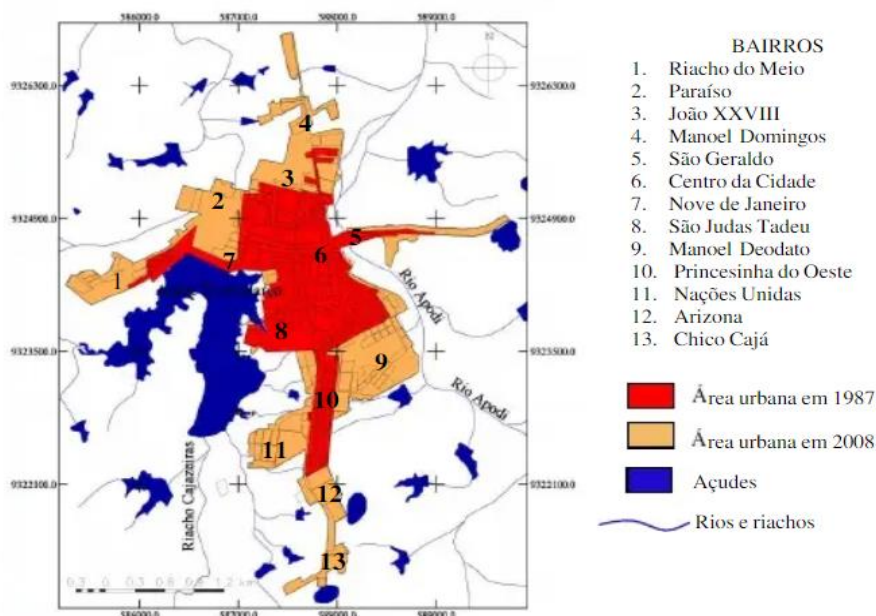
Conforme relatam Souto, Sousa Júnior e Lima Júnior (2019), Pau dos Ferros possui quase que a totalidade de sua economia baseada em atividades urbanas do setor terciário, isto é, o comércio especializado e da prestação de serviços públicos e privados de educação e saúde. Dessa forma, diferencia-se da maioria de seu entorno por apresentar 51% de sua economia pautada na prestação de serviços, sendo mais que o dobro da média de 17 cidades de sua Microrregião (20,35%) e confirmando sua posição de destaque nesse cenário (SOUTO; SOUSA JÚNIOR; LIMA JÚNIOR, 2019).

No que tange a ocupação de seu espaço urbano, inicialmente esse processo ocorreu juntamente com a formação dos primeiros bairros (Centro, São Benedito e São Geraldo), tendo como fatores ponderadores a proximidade com o leito do rio Apodi, motivada pela facilidade do acesso à água, e o delineamento das estradas que a interligavam a outros municípios ou vilas, as quais foram rotas imprescindíveis para o comércio regional (PAU DOS FERROS, 2017; COSTA; LIMA; SILVA, 2013).

Com a instalação do açude de abastecimento público 25 de Março e a densificação da região central, o processo de expansão urbana passou a se deslocar para a região oeste da cidade dando origem aos bairros Riacho do Meio, Alto do Açude e São Judas Tadeu nos anos posteriores, assim como ilustrado na Figura 6 (PAU DOS FERROS, 2017; COSTA; LIMA; SILVA, 2013).

Conforme apontam Carvalho *et al.* (2019) e Souto, Sousa Júnior e Lima Júnior (2019), nos últimos dez anos houve um crescimento da cidade nos sentidos Norte e Sul. Esse processo se deve a instalação da Universidade Estadual do Rio Grande do Norte (UERN), do Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) e do Hospital Regional Doutor Cledon Carlos de Andrade.

Figura 6 – Dinâmica espaço-temporal da ocupação urbana em Pau dos Ferros nos anos de 1987 e 2008



Fonte: Adaptado de Costa, Lima e Silva (2013).

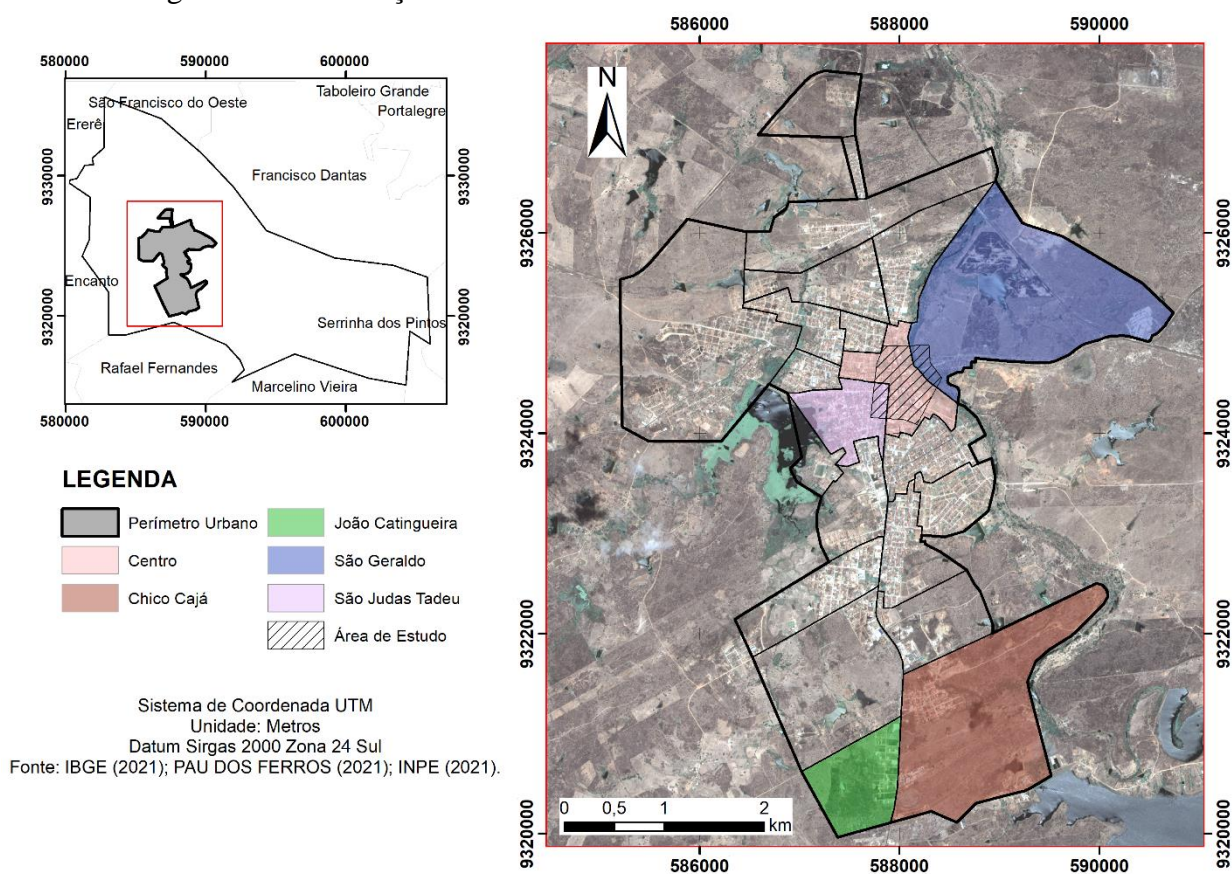
A Figura 6 mostra o processo descrito por Costa, Lima e Silva (2013) e Carvalho *et al.* (2019), evidenciando a ocupação no ano de 1987 ao longo do rio Apodi, do açude 25 de Março e da rodovia BR-405, e no ano de 2008 o avanço da mancha urbana para as direções Norte e Sul da cidade.

A ação do estado nessa expansão ainda foi complementada pelo incentivo à casa própria por meio de linhas de crédito viabilizando a origem de bairros como Nações Unidas, Zeca Pedro, Princesinha do Oeste, Bela Vista, Chico Cajá e Nova Pau dos Ferros. Além disso, o contínuo desmembramento de propriedades afastadas do centro da cidade e antes situadas na zona rural para implementação de loteamentos foi um dos fatores responsáveis pela ampliação dos limites físicos do perímetro urbano (CARVALHO *et al.*, 2019).

Com a ampliação da especulação imobiliária, sobretudo depois da instalação de novos empreendimentos como supermercados atacadistas, shoppings e de universidades particulares, Pau dos Ferros aumentou ainda mais sua faixa de ocupação na direção Sul do município. A cidade se expandiu com a instalação dos bairros Chico Cajá e João Catingueira até a divisa com o município de Rafael Fernandes/RN, assim como mostra a Figura 7.

Atualmente, a área urbana de Pau dos Ferros está organizada em 23 bairros (PAU DOS FERROS, 2021), conforme ilustrado na Figura 7, sendo 10 a mais que a quantidade delimitada por Costa, Lima e Silva (2013).

Figura 7 – Delimitação atual dos bairros e da área urbana de Pau dos Ferros



### 2.3.1 Problemas no desenvolvimento urbano de Pau dos Ferros/RN

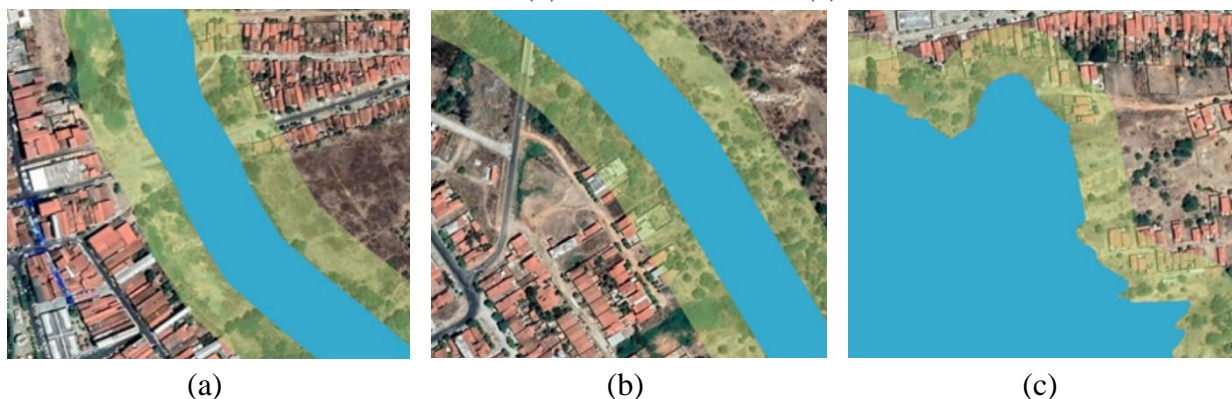
Embora marcadas pela expansão territorial e econômica, o padrão de urbanização de cidades médias apresenta uma característica típica: o avanço da malha urbana passa a se configurar como um problema graças a falta de políticas de planejamento e ordenamento territorial (GROSTEIN, 2001).

Como resultado disso, a qualidade de vida cidadina constantemente é impactada por eventos de extremos ligados a precipitação em razão de sua precária infraestrutura e a falta de planejamento que constantemente acometem as habitações, colocando-as em situações de risco (GROSTEIN, 2001). O Atlas de Saneamento (IBGE, 2011) confirma essa problemática ao relatar

que no Brasil pelo menos 58% dos municípios brasileiros possuem habitações situadas as margens dos rios e 6% possuem problemas devido à falta de infraestrutura de microdrenagem.

Pau dos Ferros vivencia essas disfunções urbanas, pois uma parcela do Centro da cidade e dos bairros São Benedito, Riacho do Meio estão inseridos em Áreas de Preservação Permanente (APP) (Figura 8). Além disso, uma série de atividades econômicas se desenvolvem nessa área cuja função é de manutenção da biodiversidade do rio Apodi, a qual deveria promover a estabilidade geológica, proteger o solo, além de assegurar o bem-estar da população (SILVA *et al.*, 2019).

Figura 8 – Invasão das habitações nas APPs no Centro de Pau dos Ferros (a) e nos bairros São Benedito (b) e Riacho do Meio (c)



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2019).

Costa, Lima e Silva (2013) afirmam que grande parte dos problemas urbanos de Pau dos Ferros se deve a falta de consideração de suas características hidrográficas no norteamo do crescimento da cidade. A Figura 8 – a e b apresentam habitações nas APP às margens do rio Apodi que também se inserem em um cenário de risco a inundação.

Figura 9 – Localização do Vertedouro do Açude 25 de Março, onde é possível comprovar a falta de planejamento no crescimento da cidade de Pau dos Ferros



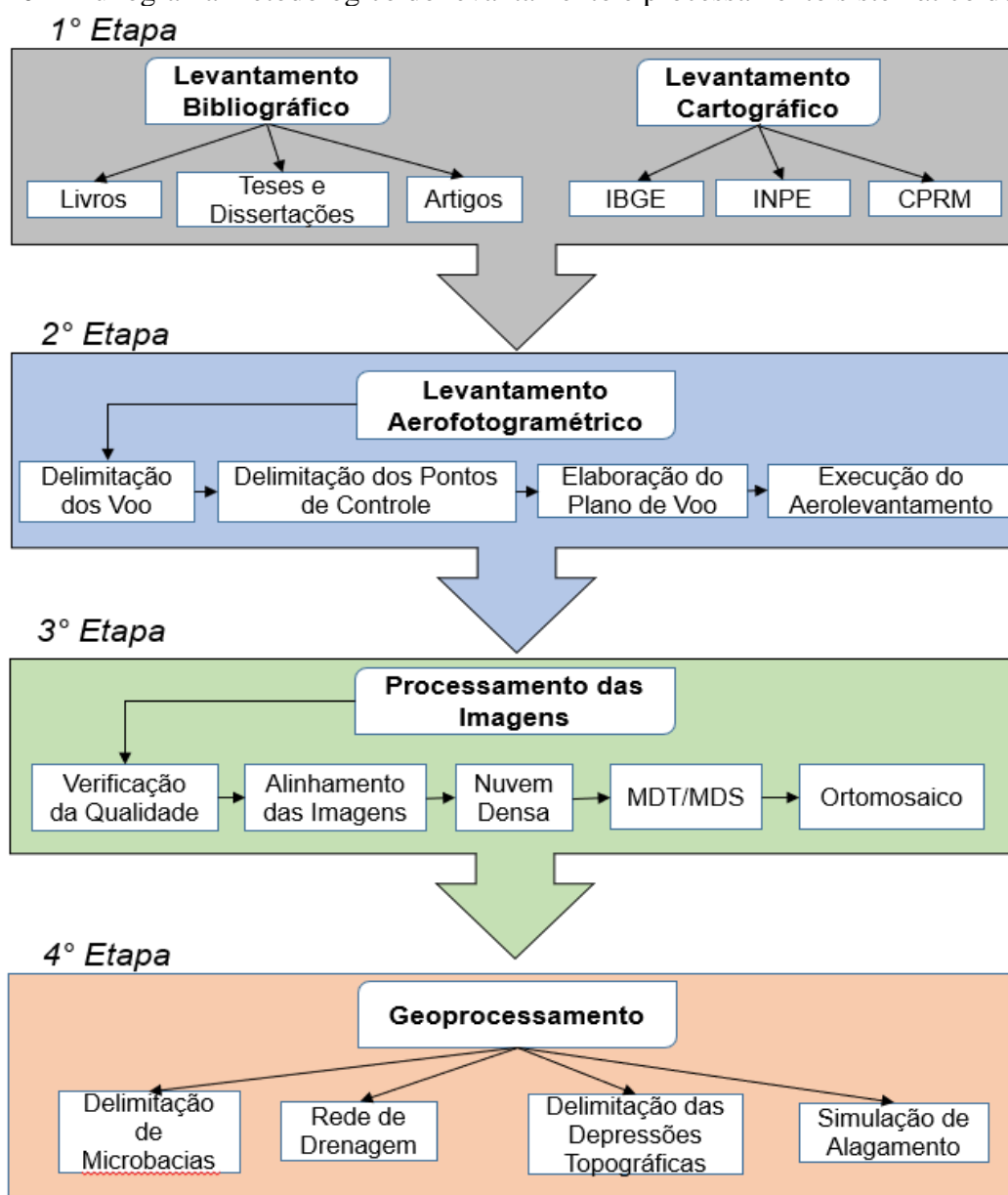
Fonte: Adaptado de Google Earth (2021) e Youtube (2021).

Com a integração da Bacia Apodi-Mossoró com a do Nordeste Setentrional por meio do PISF, a perenização do rio Apodi modificará a realidade da população ribeirinha aumentando as chances da ocorrência de alagamentos e inundações (COSTA; LIMA; SILVA, 2013; SILVA *et al.*, 2019). Além disso, o açude 25 de Março está situado no núcleo urbano de Pau dos Ferros (Figura 9), podendo submeter os habitantes a condições de risco à inundação e enchentes.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Na construção da metodologia da presente dissertação foram utilizados equipamentos que viabilizaram a aquisição dos dados, visitas *in loco*, além de softwares para o emprego de ferramentas de geoprocessamento, possibilitando a análise do problema do alagamento da área de estudos. Dessa forma, a linha de ação metodológica foi dividida em 4 etapas, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma metodológico do levantamento e processamento sistemático dos dados



### **3.1 Levantamento Bibliográfico e Cartográfico**

No levantamento bibliográfico foi realizada uma compilação de produções atuais técnico-científicas, possibilitando a compreensão da temática a ser abordada, subsidiando a formação teórica com base em artigos científicos, teses, dissertações e livros. Para tanto, foi realizada uma busca nas seguintes bases de dados: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações, Periódicos Capes, *Scientific Electronic Library Online (SciELO)* e Google Acadêmico.

Nas bases de dados foram realizadas a pesquisa de trabalhos através da combinação dos seguintes termos: Veículos Aéreos Não Tripulados, Inundação Urbanas, Geotecnologias, EEP, Caracterização Climática, Modelos Digitais de Elevação. Sendo assim, os trabalhos que foram selecionados serviram como base teórica para o planejamento da metodologia e para as discussões dos resultados apresentados.

Para elaboração dos mapas temáticos foi realizado um levantamento cartográfico nos portais eletrônicos do IBGE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

### **3.2 Levantamento Aerofotogramétrico**

Para execução do aerolevantamento foi utilizado um VANT da marca DJI e modelo *Phantom 4* (Figura 11). O equipamento possui com uma câmera de 20 MP com lentes calibradas para distorção radial e tangencial cuja função é de reduzir os defeitos na etapa de processamento das imagens.

Ele conta com um receptor de Sistema Global de Navegação por Satélite (do Inglês *Global Satellite Navigation System – GNSS*) com o método de Posicionamento Cinemático em Tempo Real (do Inglês *Real Time Kinematic – RTK*) que recebe o sinal e corrige instantaneamente com uma base em solo (D-RTK) por meio das frequências L1 e L2.

A área de estudo foi imageada através de três sobrevoos. Cada um deles possuiu uma área inferior a 15 hectares, pois assim o tempo de execução individual ficou inferior a 22 minutos e, conseqüentemente, ao tempo de trabalho recomendado das baterias.

Figura 11 – VANT utilizado na aquisição das aerofotografias



Para minimizar a distorção nas bordas dos produtos gerados na etapa de processamento das imagens foi delimitado uma região de sobrevoo com um *buffer* de 30 m maior que a área de estudo. Dessa forma, a região que concentra a maior parte das distorções devido à baixa sobreposição das imagens foi eliminada a fim de conferir maior precisão aos produtos finais.

Cada um dos sobrevoos foi delimitado no *software* Google Earth Pro e exportados em extensão “.kml”. Esses planos de voo foram repassados para o rádio do VANT, onde foram definidas as variáveis necessárias para execução dos voos, como: velocidade, sobreposição frontal e lateral de imagens e altitude de sobrevoo (Tabela 1).

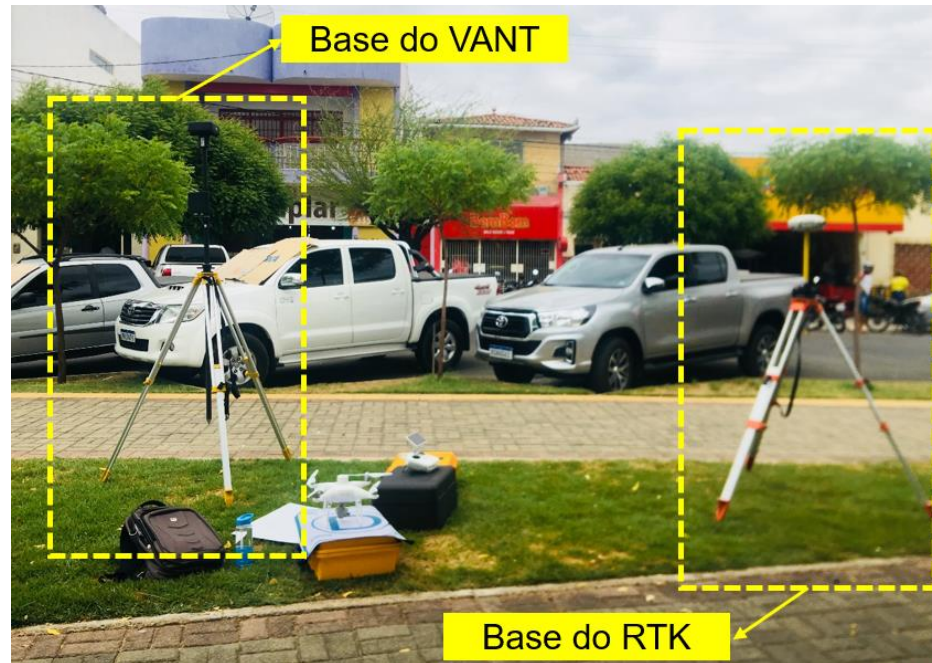
Tabela 1 – Dados de entrada para o plano de voo da área de estudo

Variável do Plano de Voo	Valor Utilizado
Altitude	100 m
Velocidade de Sobrevoos	10 m/s
Sobreposição Lateral	60%
Sobreposição Frontal	80%

A altitude empregada nos planos de voo teve como base o cálculo da Distância da Amostra do Solo (do inglês *Ground Sample Distance* – GSD) considerando a distância focal da câmera e as escalas de trabalho dos produtos produzidos. As sobreposições utilizadas tiveram como base os valores utilizados por Jorge e Inamasu (2014) e Oliveira *et al.* (2017).

Antes da execução do sobrevoo foram instaladas próximo do local de decolagem a base do D-RTK para comunicação com o VANT e a do receptor geodésico RTK X91 da marca CHC para coleta dos Pontos de Controle no Solo (no inglês *Ground Control Points*), tal como ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Bases utilizadas para o VANT e para o RTK



Os aerolevamentos, assim como a coleta dos Pontos de Controle em Terra (no inglês *Ground Control Points – GPC*) ocorreu no dia 26/10/2019. A aquisição de pontos geodésicos se deu por meio da centralização do rover nos de alvos artificiais que foram distribuídos em locais abertos na extensão da área de estudo de modo que pudessem ser identificados nas imagens coletadas (Figura 13). O formato de saída do dados era próprio do equipamento (.HCN) e, por esse motivo, foi necessário realizar a conversão para o formato “.RINEX” a fim de realizar a correção das coordenadas.

A correção dos dados da base e do rover ocorreu através do Posicionamento de Ponto Preciso (PPP) do IBGE os quais ainda foram acrescidos da ondulação geoidal constante de -7,68 m na região de estudo. Dessa forma, após tratados, estes dados serviram como base para conferir acurácia aos produtos obtidos no processamento das imagens.

Figura 13 – Coleta de ponto geodésico em um alvo artificial fotoidentificável com rover



Os 17 pontos coletados foram, portanto, corrigidos e convertidos de coordenadas geográficas no *Datum* WGS 84 para Universal Transversa de Mercator (UTM) com *Datum* SIRGAS 2000 Fuso 24 Sul (Tabela 2).

Tabela 2 – Coordenadas dos pontos de controle coletados e processados

<b>Identificação</b>	<b>N (m)</b>	<b>E (m)</b>	<b>Z (m)</b>
BASE	9324522,4380	587940,4470	181,5334
PV03	9324739,6228	588132,4550	177,8637
PV01	9324642,1050	588062,0591	177,0866
PV02	9324687,7199	587930,3228	179,0700
P03	9324592,9147	587846,5588	180,5693
P10	9324536,7127	587938,4689	181,3725
P11	9324384,836	587967,8088	183,6732
P12	9324225,7017	587944,1770	182,4683
P13	9324329,403	587834,9638	188,4795

P14	9324402,6842	587842,1262	185,9774
P05	9324500,0748	587992,3023	181,5313
P06	9324602,667	588119,4964	177,0638
PV05	9324549,181	588137,5242	176,9601
P07	9324341,4209	588176,8157	179,7692
P08	9324272,106	588130,3670	182,7905
PV06	9324255,7929	588028,2085	181,8253
PV04	9324357,7514	588057,3889	180,8813

Concomitante ao uso do GNSS de apoio ocorreu a execução do aerolevanteamento cuja duração total foi de 56 minutos e contou com 478 imagens coletadas. Esses dados, por sua vez, foram encaminhados para a etapa de processamento e formulação dos produtos cartográficos.

### 3.3 Processamento Digital de Imagens

O processamento das imagens ocorreu por meio do *software* Agisoft Metashape versão 1.5.1. O computador empregado para tal feito foi um Dell Inspiron 14 5000 com processador i5 de 2.5 GHz, 12 Gb de memória RAM, placa de vídeo NVIDIA GeForce 940MX de 4 Gb e SSD de 128 Gb. As características da máquina foram ressaltadas, pois o não atendimento dos requisitos mínimos recomendados pelo *software* podem implicar em lentidão para execução ou mesmo perda de qualidade do produto final.

O fluxo de trabalho dessa etapa se dividiu em sete passos. Todas as etapas do processamento das imagens que dependiam de algum parâmetro de qualidades foram realizadas em nível elevado. Para tanto, gastou-se no processo total um tempo aproximado de 16 horas e 41 minutos (Tabela 3).

Tabela 3 – Precisão e tempo gasto nas etapas de processamento do aerolevanteamento

TAREFA	PRECISÃO	TEMPO
Análise de Qualidade	-	26 min
Alinhamento das Imagens	Elevada	42 min
Mapa de Profundidade	Elevada	5 h e 51 min
Nuvem de Pontos Densa	Elevada	8 h e 53 min
MDS	-	3 min

MDT	-	4 min
Ortomosaico	-	42 min

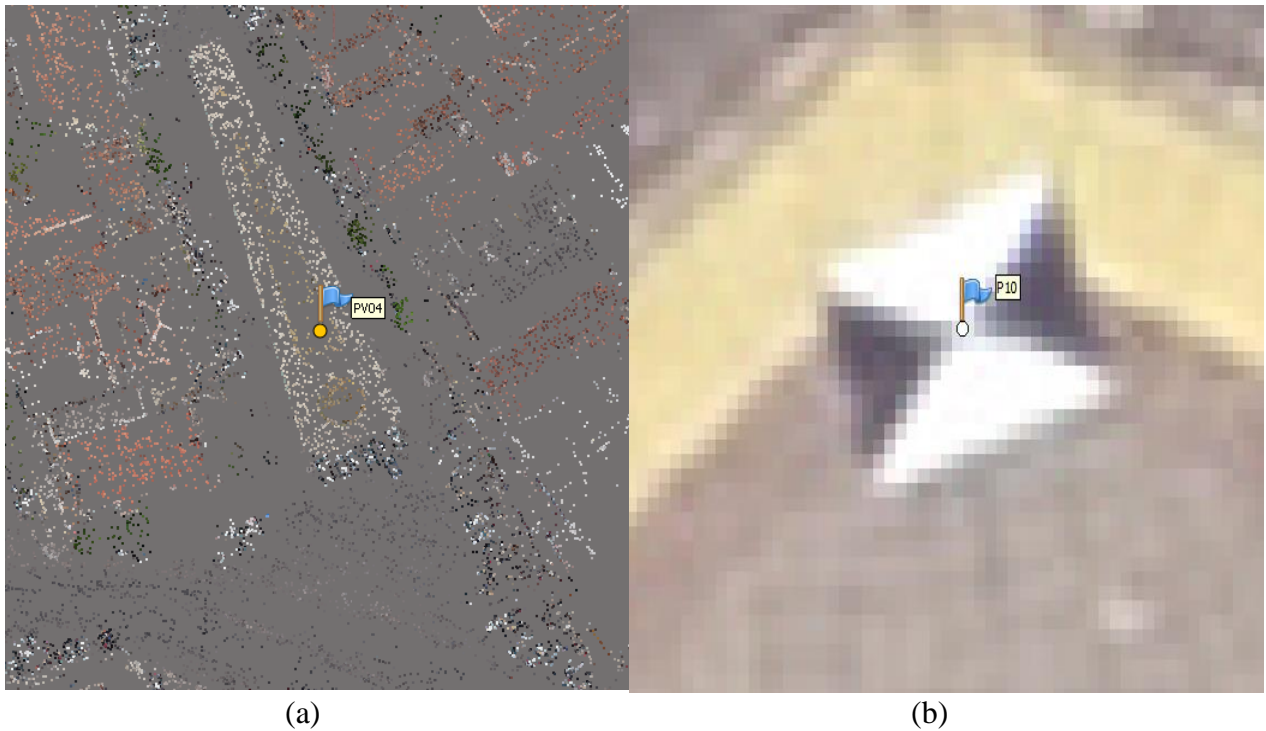
Para a escolha do nível de precisão em cada etapa foram realizados ao todo 6 processamentos. Dessa forma, os fatores ponderados para essa escolha foram: o tamanho do produto gerado, o esforço computacional no processamento e a qualidade dos resultados.

No processamento, inicialmente as imagens foram importadas para o Agisoft Metashape, onde passaram por uma reprojeção do *datum* WGS 84 para a projeção SIRGAS 2000 UTM/Zona 24 Sul. Logo após, foram submetidas a análise de qualidade que durou 26 minutos, onde elas foram parametrizadas por um índice que varia de 0 a 1. Através desse valor, verificou-se a ocorrência de imagens com índice de qualidade abaixo de 0,5 (AGISOFT, 2021), pois nesse caso a baixa qualidade das imagens impactará na geração dos próximos produtos no fluxo de trabalho.

As imagens que foram submetidas ao processo de alinhamento, que durou 42 minutos, foram discretizados 479.514 pontos com coordenadas x, y e z de modo a constituir uma nuvem espaçada (no inglês *tie point cloud*). A função principal desse procedimento é encontrar os pontos homólogos nas sobreposições das imagens e produzir um produto com lapsos na informação do terreno na região no espaçamento entre os pontos (Figura 14 – a).

Os GPC também foram utilizados nesse procedimento de modo que os pontos da Tabela 3 foram inseridos no Agisoft Metashape por meio de marcadores. Estes, por sua vez, foram ajustados para o centro dos alvos em cada imagem (Figura 14 – b) com a finalidade de realizar um novo alinhamento das imagens e aumentar a acurácia dos produtos que foram posteriormente gerados.

Figura 14 – Pontos empregados no processamento do aerolevanteamento: (a) Representação básica da nuvem de Tie Points, evidenciando os lapsos de informação entre os pontos; (b) Centralização do marcador em um alvo fotoidenticável



A nuvem de *Tie Points* corrigida com os pontos de controle serviu como base para gerar o Mapa de Profundidade e a Nuvem de Pontos Densa (no inglês *Dense Cloud*). O Mapa de Profundidade tem a função de geração dos contornos acima do terreno, enquanto a *Dense Cloud* aumentou a quantidade de pontos para 55.996.586, quantidade 115 vezes maior que a *Tie Point*.

O tempo total gasto para produção desses dois produtos foi de 14 horas e 44 minutos, representando o passo mais demorado de todo processamento. As Figuras 15 (a) e (b) ilustram a *Dense Cloud* para dois recortes espaciais na área de estudo: as ruas Getúlio Vargas e a Bevenuto Fialho, respectivamente, evidenciando um produto mais preenchido de pontos e que representa a elevação dos objetos acima do nível do terreno de maneira mais realista.

Figura 15 – Recorte espacial da Dense Cloud para: (a) R. Getúlio Vargas e (b) Bevenuto Fialho



a)



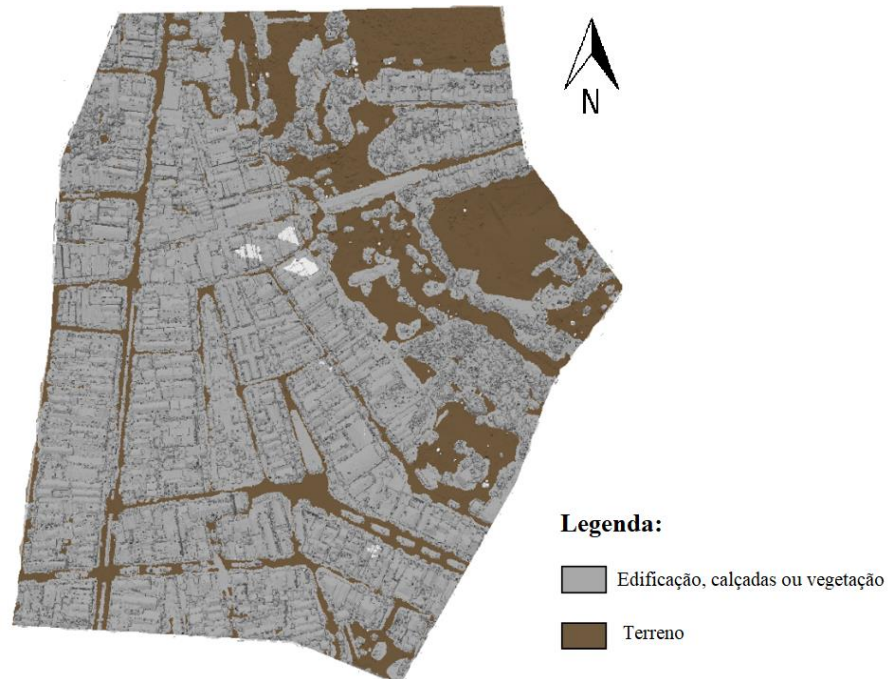
b)

O MDE gerado no Agisoft Metashape se baseia na *Dense Cloud* gerada anteriormente. Como ela representava não só o contorno do terreno, mas também os obstáculos acima dele, o processamento do MDE produziu primeiramente o MDS. Para produção do MDT foi realizada uma filtragem das edificações, calçadas, vegetação e demais objetos que não representavam o nível do terreno.

Para tanto, foi realizada a classificação automática da *Dense Cloud* por meio da ferramenta “*classify ground points*”. As localidades não filtradas automaticamente foram selecionadas através da classificação supervisionada, onde manualmente os pontos acima do terreno foram selecionados e alocados uma categoria diferente da associada para o terreno pela ferramenta “*assing class*”.

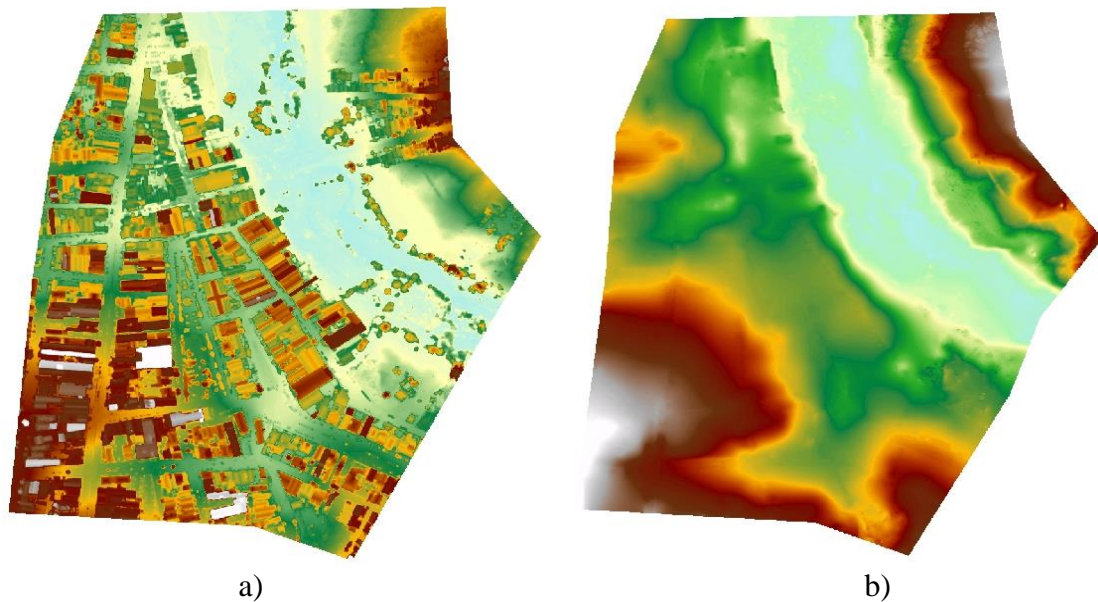
A Figura 16 evidencia que apenas uma pequena parcela da área corresponde de fato ao terreno (ilustrado pela cor marrom), enquanto a maior parte da área de estudo é, na verdade, composta por edificações, calçadas e vegetação.

Figura 16 – Filtragem dos pontos acima do nível do terreno



O tempo demandado para produção desses MDEs é pequeno se comparado com o processamento de outros resultados, de modo que a geração do MDS e MDT duraram 3 e 4 minutos, respectivamente. Além disso, ambos tiveram 10,6 cm de resolução espacial. O resultado final do MDS e do MDT está ilustrado nas Figuras 17 (a) e (b), respectivamente.

Figura 17 – Modelos Digitais de Elevação da área de estudo, sendo a) MDS e b) MDT



O ortofotomosaico incluindo os GPCs utilizados no fluxo de trabalho do Agisoft Metashape, onde as 478 imagens foram unidas por meio de um mosaico em perspectiva ortogonal. O tempo gasto na ortorretificação e produção do mosaico foi de 42 minutos e o produto final apresentou uma resolução espacial de 2,65 cm (Figura 18).

Figura 18 – Ortofotomosaico produzido com os GPC distribuídos na área de estudo



Dentre os produtos obtidos na etapa do processamento das imagens, os MDEs foram essenciais para as análises de fluxo superficial e de acumulação de águas pluviais. O ortomosaico, por outro lado, foi empregado na vetorização de edificações, arruamentos e na produção geral de *shapefiles* oriundos do aerolevanteamento.

Dos pontos mostrados na Figura 18, 12 deles foram utilizados como pontos de controle para conferir acurácia aos resultados e 5 empregados para a realização da mensuração dos erros posicionais. Dessa forma, o Agisoft Metashape forneceu essas informações através do relatório de processamento. Através dele se notou que mesmo o VANT estando embarcado com GNSS de precisão, os produtos finais ainda apresentam um elevado erro que se situa na faixa de  $\pm 2,45$  m para planimetria e  $\pm 6,95$  m para altimetria, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Erros antes e após a utilização de pontos de controle (GPC) para correção posicional

	<b>E<sub>X</sub> (cm)</b>	<b>E<sub>Y</sub> (cm)</b>	<b>E<sub>Z</sub> (cm)</b>	<b>E<sub>XY</sub> (cm)</b>	<b>E<sub>XYZ</sub> (cm)</b>
<b>Sem GPC</b>	243,056	33,5407	695,851	245,359	737,841
<b>Com GPC</b>	7,87199	4,24534	2,43269	8,94377	9,26871

A Tabela 4 também evidencia que a utilização dos pontos de controle se reflete na redução do erro total, de modo que esse caiu de 737,841 cm sem o emprego de GPCs para 9,26 cm com a sua utilização. Logo, independente do equipamento, os pontos de controle são indispensáveis para obtenção de resultados precisos e acurados.

### 3.4 Elaboração de dados em Sistema de Informações Geográficas (SIG)

Toda etapa de implementação de métodos de geoprocessamento foi executada no ambiente SIG por meio da utilização do *software* ArcGis da ESRI, versão 10.3. As ferramentas voltadas para manipulação e produção de análises hidrológicas foram executadas através da extensão Arc Hydro 2.0.

#### 3.4.1 Produção dos Modelos Digitais de Elevação

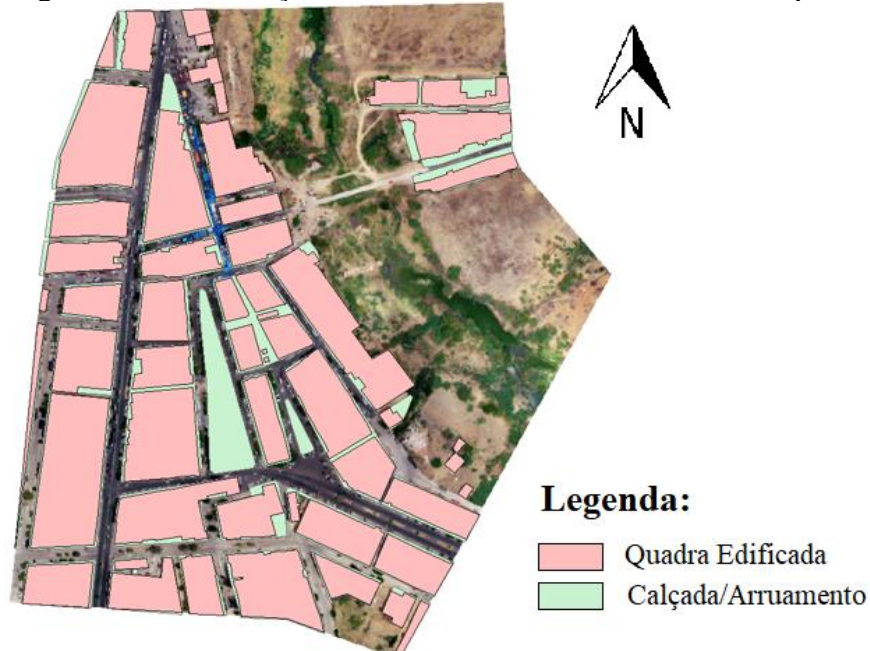
A compreensão do problema do alagamento em Pau dos Ferros ocorreu em duas escalas de trabalho: 1:150.000, aplicada na análise do fluxo superficial e do relevo do núcleo urbano, e 1:500, escala de trabalho da área de estudo em que foram mapeadas as depressões topográficas, compreendida a dinâmica do fluxo superficial das águas pluviais e simulados os alagamentos.

As análises hidrológicas na escala de 1:150.000 foram realizadas com o MDE SRTM de Topodata, disponibilizado pelo Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil do INPE. Este foi obtido a partir do refinamento do SRTM para todo território nacional e possui resolução espacial de 1 segundo de arco, aproximadamente 30 m (VALERIANO; ROSSETTI; ALBUQUERQUE, 2009).

Por outro lado, as análises na escala de 1:500 ocorreram com os MDEs produzidos através do levantamento aerofotogramétrico do VANT. Foram utilizados três modelos para comparação: o simplificado, proposto por Lee *et al.* (2016); e os modelos obtidos pelo processamento das imagens sem e com correção.

No modelo simplificado, o ambiente antrópico foi simulado a partir da vetorização da ortofoto produzida. Para tanto, os polígonos foram transformados em *shapefile* com atributos de elevação, sendo 0,2 e 20 metros para calçadas e lotes urbanos, respectivamente (Figura 19).

Figura 19 – Vetorização do ambiente urbano na forma de shapefiles

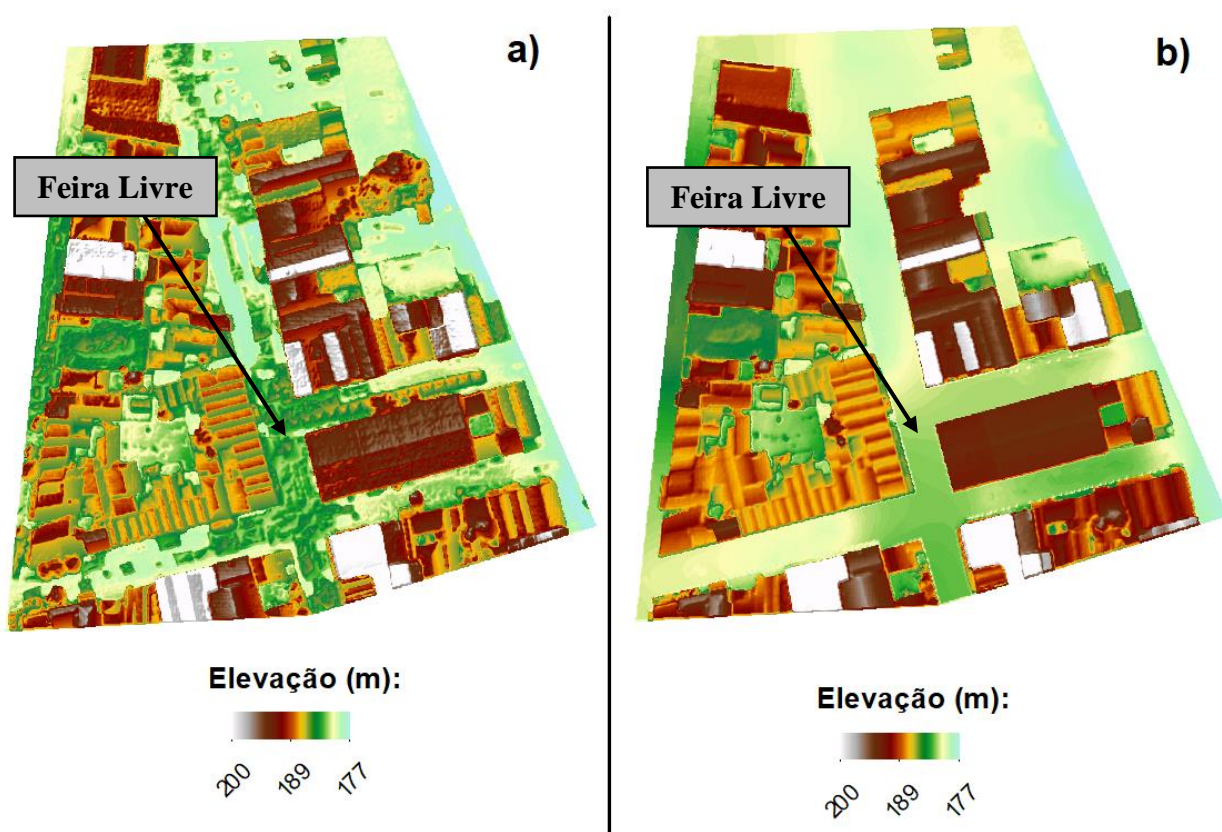


Posteriormente, os *shapefiles* foram transformados em *raster* pela ferramenta *Polygon to Raster* com o valor da elevação como campo de valor aplicado aos *pixels*. O *raster* resultante desse processo foi somado ao MDT através da ferramenta *Raster Calculator* dando origem ao MDS Simplificado proposto por Lee *et al.* (2016).

O MDS corrigido foi obtido a partir da junção de dois recortes obtidos pela ferramenta *Clip*, sendo eles: as quadras do MDS sem modificação e das vias do MDT. Cada um desses MDEs teve os *pixels* ajustados, onde foi utilizada uma expressão condicional que identifica valores *no data* e os substitui por zero com as funções “Com” e “IsNull” do *Raster Calculator*.

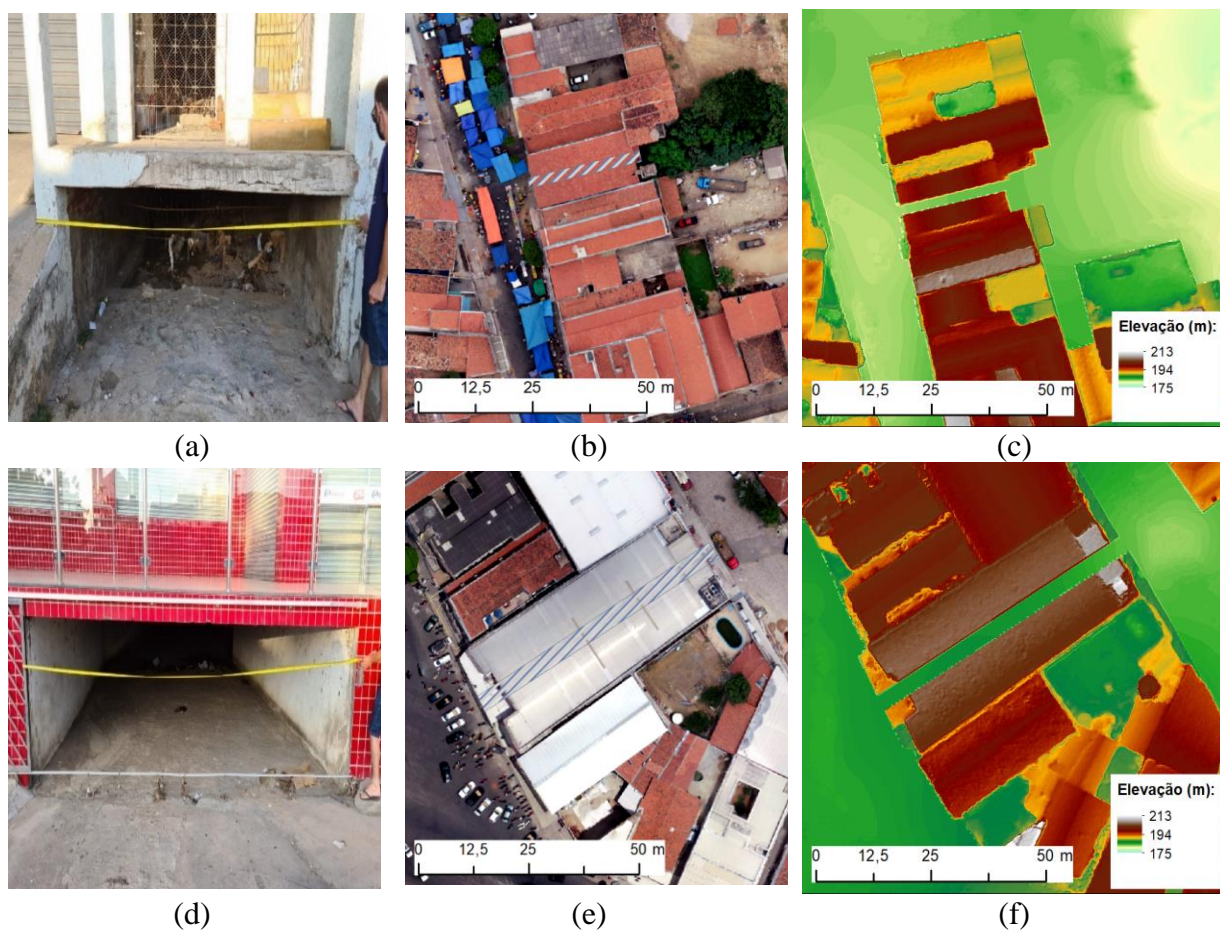
Dessa forma, o *Raster Calculator* foi novamente empregado a fim de somar as elevações dos recortes do MDS com o MDT. Dessa forma, foram retirados do modelo veículos, barracas, pessoas e demais objetos não permanentes ao terreno que estavam situados nas vias no momento do aerolevanteamento (Figuras 20 (a) e (b), respectivamente).

Figura 20 – Processamento do MDE no recorte espacial da feira livre: (a) MDS inalterado; (b) MDS corrigido com a remoção dos obstáculos acima no nível do terreno nas vias



No MDS corrigido e no simplificado foram modeladas as aberturas das galerias de drenagem nas ruas Bevenuto Fialho (Figura 21 – (a), (b) e (c)) e Getúlio Vargas (Figura 21 – (d), (e) e (f), respectivamente), conforme as dimensões medidas aferidas in loco. Nas localidades hachuradas das Figuras 21 (b) e (d) foi utilizado o MDT para possibilitar a passagem do fluxo das águas pluviais, enquanto nas demais trechos das edificações foi empregado o MDS.

Figura 21 – Galeria de drenagem e localidade (região hachurada) onde foi modelada a drenagem e MDE da rua Bevenuto Fialho, (a), (b) e (c), e Getúlio Vargas, (d), (e) e (f), respectivamente



O processo ilustrado nas Figuras 21 (c) e (f) foi aplicado na elaboração do MDS simplificado e corrigido, porém o MDS obtido diretamente pelo processamento das imagens não foi alterado com o intuito de verificar a sua validade sem qualquer ajuste prévio. Por fim, na comparação dos três modelos foi empregada a análise visual das depressões topográficas e da rede de drenagem encontradas na etapa de elaboração de dados em SIG a fim de verificar as principais diferenças entre os resultados.

### 3.4.2 Delimitação das microbacias e rede de drenagem

Para modelagem da rede de drenagem e das microbacias existentes na região de estudo foi realizado um preenchimento no MDS pela ferramenta *Fill Sinks* para eliminação de pixels sem direção de drenagem, corrigindo-os em relação aos seus adjacentes.

Logo após, foi realizada uma rotina de processamento no MDS ajustado a fim de calcular a direção de fluxo e a ocorrência de acúmulos superficiais na rede de drenagem. No fluxo de trabalho para elaboração desses resultados foram utilizadas sequencialmente as ferramentas: *Flow Direction*, *Flow Accumulation*, *Stream Definition*, *Stream Segmentation*, *Drainage Line Processing*, *Catchment Grid Delineation* e *Catchment Polygon Processing*.

Na utilização do *Stream Definition* foi definido a densidade dos canais de drenagem com uma área de influência de 3.000 m<sup>2</sup>, valor compatível com a escala de trabalho da área de estudo (1:500) e tida como recomendado pelo manual da extensão. Dessa forma, foram gerados os dados necessários para análise do fluxo superficial e, conseqüentemente, as áreas de acumulação de águas pluviais.

### 3.4.3 Delimitação das depressões topográficas

A identificação das depressões topográficas se deu com a detecção de células que não possuíam direção de drenagem definida nos MDS analisados. Esse procedimento foi executado através das ferramentas *Fill* e, posteriormente, *Cut Fill* cuja função é de calcular o volume e a área onde houve preenchimento ou remoção pela utilização do *Fill*.

Os dados de entrada para execução do *Cut Fill* foram o MDS original e o produzido com a ferramenta *Fill*. O resultado desse procedimento além de localizar as regiões críticas, gerou uma tabela de atributos que continha as extensões e o volume que apresentava valor menor que zero em caso de preenchimento (depressões), maior que zero na remoção de informação e igual a zero quando não houve alteração.

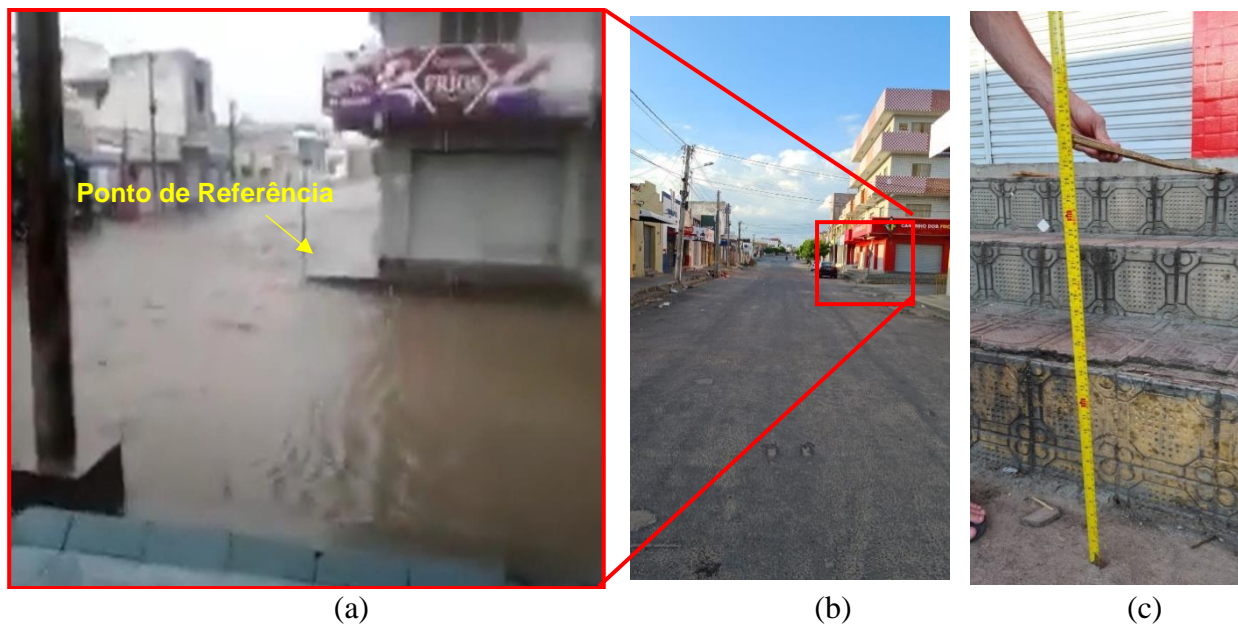
Dessa forma, foram deletadas as áreas com volume foi maior ou igual a zero a fim de deixar apenas as depressões topográficas. Além disso, foram removidas também as localidades que não estavam situadas sobre os arruamentos. A ferramenta *Raster to Polygon* complementou esse processamento, transformando os dados do formato de imagem para vetor juntamente com seus atributos, permitindo a elaboração de simulações de mapas das depressões topográficas identificadas.

### 3.4.4 Simulação de alagamentos

Para determinação da profundidade máxima de cada depressão topográfica foi utilizada a ferramenta *Zonal Statistics*, onde foram utilizados como dados de entrada o MDS analisado e a delimitação das depressões topográficas. O resultado desse processo foi um raster em que todos os seus pixels representavam o valor mínimo de elevação de cada depressão topográfica.

A partir do valor mínimo foi simulada a elevação do nível de água na depressão topográfica até que a mancha de inundação atinja o dispositivo de drenagem localizado mais próximo. Para tanto, utilizou-se a ferramenta *Less Than Equal* para evidenciar os pixels do MDE que estavam abaixo de uma elevação definida.

Figura 22 – (a) Registro de alagamento na R. Bevenuto Fialho no dia 18/02/2017; (b) atualmente; (c) Medição de um ponto de referência

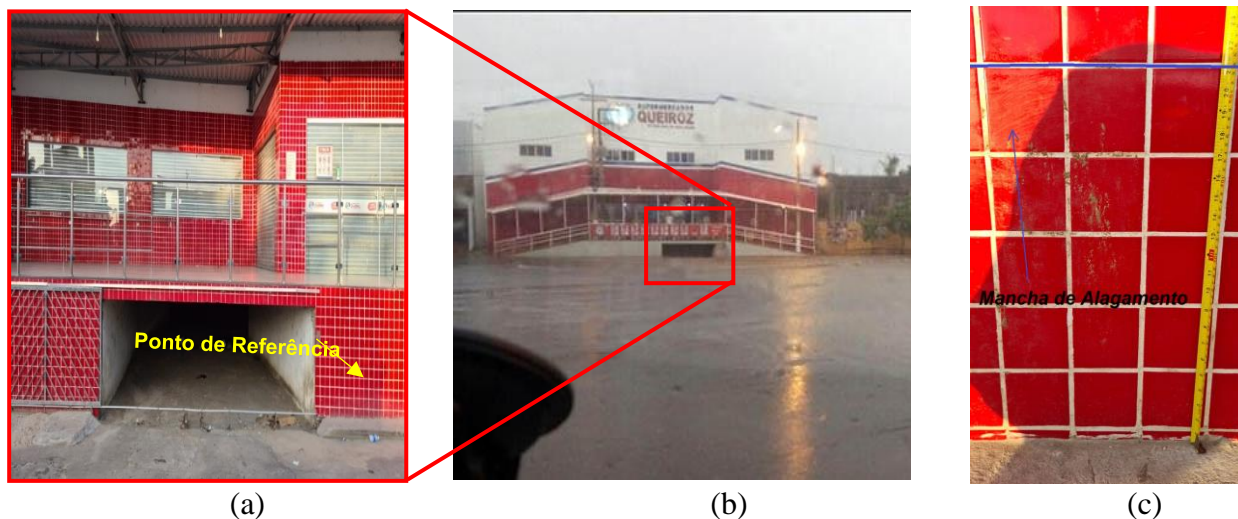


Admitiu-se, portanto, como dado de entrada no *Less Than Equal* a elevação mínima na depressão topográfica adicionada de 10 cm. Esse procedimento foi iterativo, onde o valor da elevação anterior foi adicionado ao passo de 10 cm, simulando assim a elevação da lâmina de alagamento até que esta alcance as bocas de lobo ou escoes pelas galerias que estão direcionadas para o rio Apodi.

Para determinação das áreas atingidas em eventos extremos de precipitação, foi observado publicações em sites, blogs, jornais ou demais meios informativos, que apresentassem fotografias

dos ambientes alagados com a respectiva data de ocorrência. Nessas fotografias, foram identificadas também pontos de referência, como a altura de calçadas que foram submergidas, a fim de verificar a altitude de alagamento (Figuras 22 e 23).

Figura 23 – (a) Registro de alagamento R. Getúlio Vargas no dia 18/02/2017; (b) atualmente; (c) Medição de um ponto de referência



As alturas cotadas, conforme ilustrado nas Figuras 22 (c) e 23 (c), foram adicionadas às elevações obtida no MDS nas localidades onde foram realizadas as medidas *in loco*. O valor resultante desse processo foi utilizado como dado de entrada na ferramenta *Less Than Equal*, evidenciando assim as localidades mais afetadas na ocorrência de um EEP com base em observações de campo e possibilitando comparar o escoamento superficial com a disposição dos dispositivos de drenagem existentes.

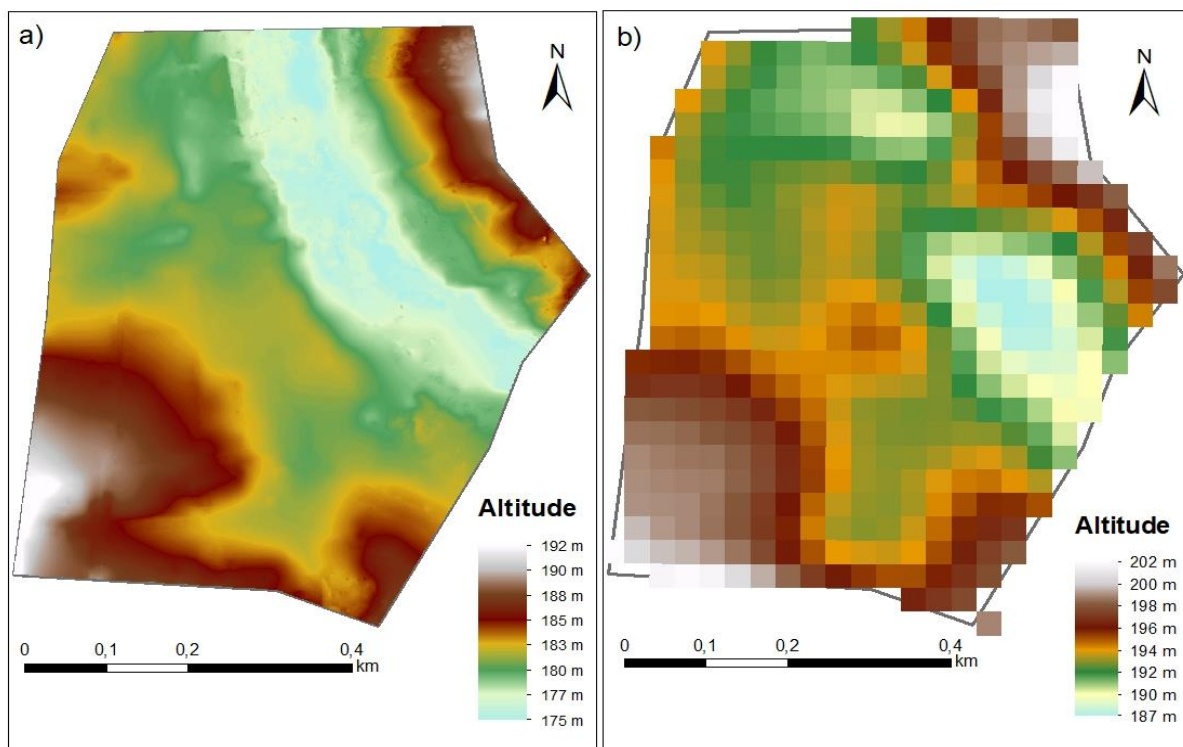
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse tópico serão apresentados os resultados alcançados na aplicação dos procedimentos metodológicos adotados. Avaliou-se os Modelos Digitais de Elevação com base nas depressões topográficas e na rede de drenagem obtidas através de métodos de geoprocessamento. Por fim, foi escolhido o MDE que serviu como base para simulação do aumento do nível da lâmina de alagamento e observou-se as regiões mais afetadas por esse fenômeno.

### 4.1 Avaliação dos Modelos Digitais de Elevação

A comparação entre o MDT produzido pelo processamento aerofotogramétrico e o MDE do SRTM evidencia que na área de estudo a faixa de variação entre os dois modelos é de 17 e 15 metros, respectivamente. A comparação visual também mostra uma semelhança entre ambos, onde a sudoeste e nordeste são encontrados os pontos mais elevados do terreno (Figura 24).

Figura 24 – Comparação entre o MDE produzido por um VANT (a) e o obtido pelo SRTM (b), evidenciando uma maior quantidade de informações nos modelos produzidos pelo VANT

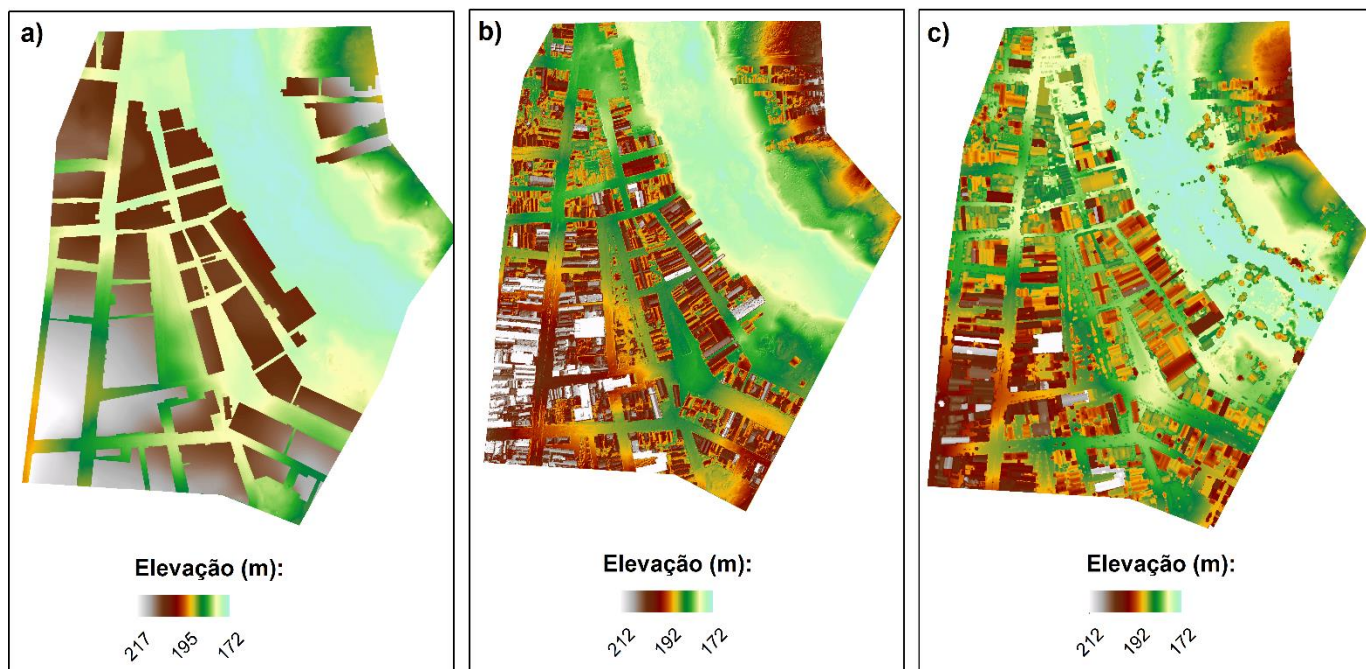


A Figura 24 (b) evidencia que, na escala de trabalho da área de estudo, o Topodata não é dado de entrada adequado, pois a área do seu *pixel* tem valor relevante perante a extensão de estudo, conduzindo a perdas de informações importantes nas análises hidrológicas. Leitão *et al.* (2016) reforçam essa ideia afirmando que para uma maior precisão e acurácia na representação do fluxo superficial nos ambientes urbanos os MDE devem possuir uma resolução espacial menor que 5 m.

A carta de risco elaborada por Costa, Lima e Silva (2013) classifica toda a área de estudo como alto risco à inundação com base nos dados do SRTM para a cidade de Pau dos Ferros na escala de 1:18.000. Porém, assim como evidencia a Figura 24 (b), esse modelo não tem validade em escalas de trabalho grandes como na área de estudo.

Com base nisso, elaborou-se as modelagens hidrológicas para três MDS: o simplificado proposto por Lee *et al.* (2016), o corrigido e o sem alteração. Ambos utilizados seguem a recomendação de Leitão *et al.* (2016) quanto a resolução espacial (Figura 25).

Figura 25 – (a) MDS Simplificado; (b) MDS Corrigido e (c) MDS sem modificação

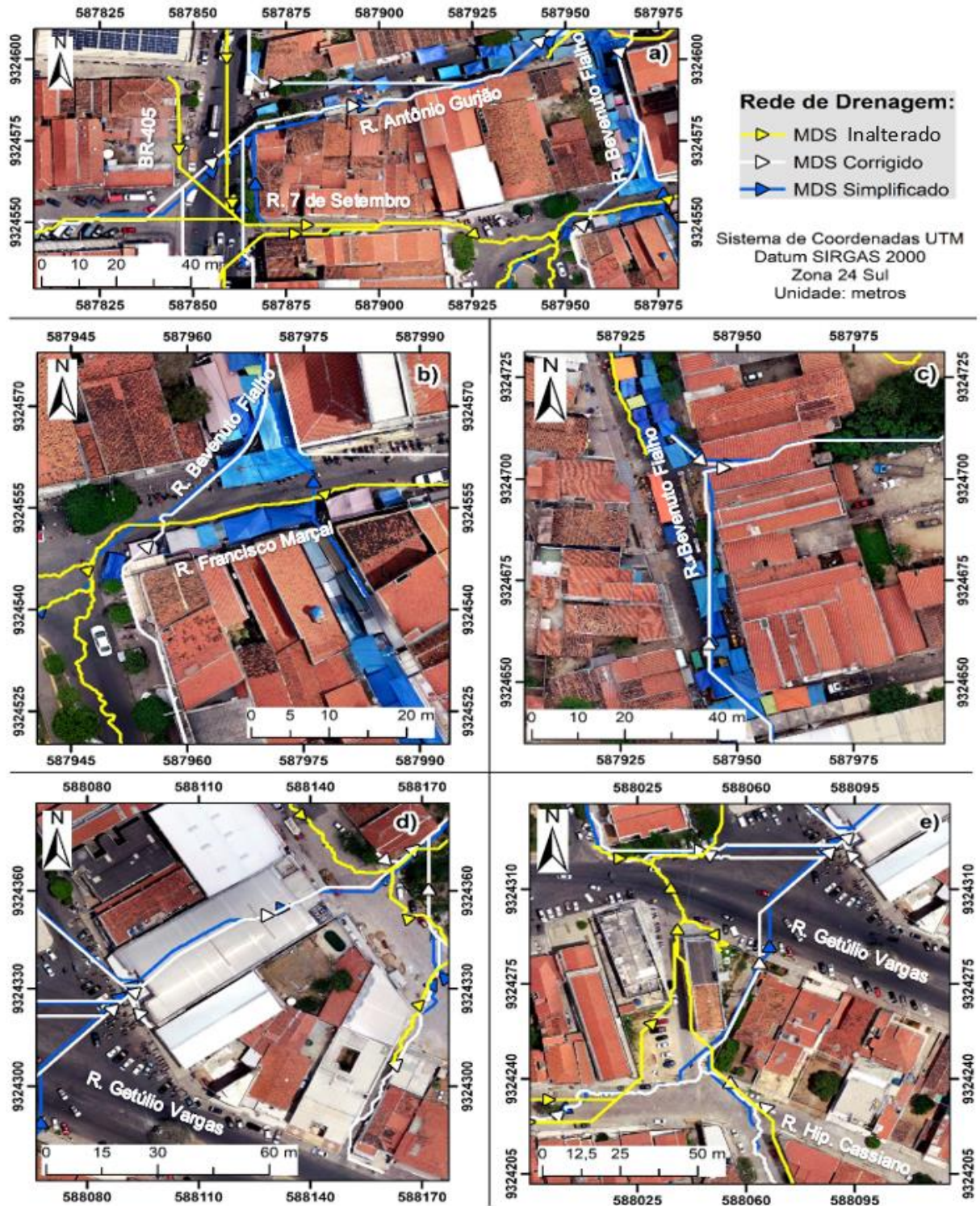


Nesse sentido, as Figuras 26 e 27 ilustram o resultado da implementação de métodos de geoprocessamento no relevo para identificação das depressões topográficas e na simulação do fluxo superficial das águas pluviais através da rede de drenagem para a área de estudo, respectivamente.

Figura 26 – Delimitação das depressões topográfica segundo os modelos utilizados em duas zonas de detalhes: REGIÃO 1 e REGIÃO 2



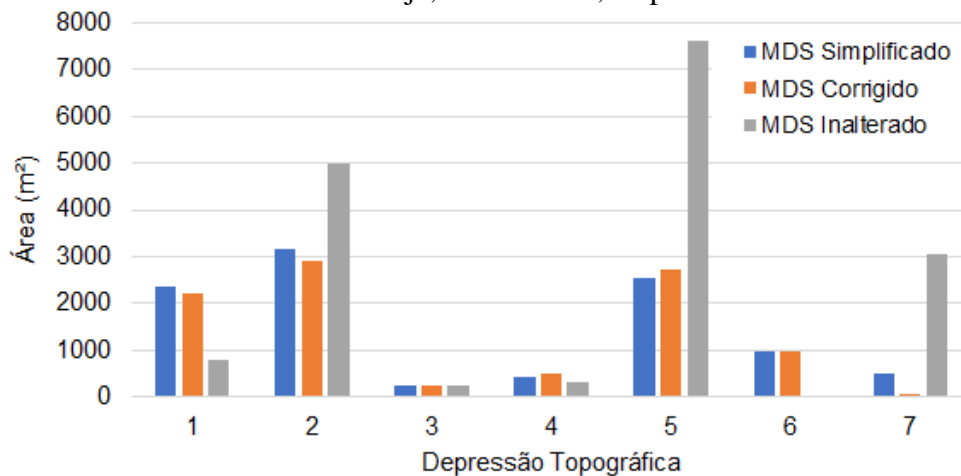
Figura 27 – Rede de drenagem considerando o sentido do fluxo segundo os modelos utilizados nas seguintes localizações: (a) Cruzamento da av. Independência (BR-405) com a r. Antônio Gurjão e r. Sete de Setembro; (b) r. Praça da Matriz; (c) r. Bevenuto Fialho; (d) rua Hipólito Cassiano e (e) r. Getúlio Vargas



Através do relevo da área de estudo se identificaram 7 depressões topográficas nas simulações em que foi utilizado o MDS simplificado e o corrigido, e 6 no inalterado. A Figura 26 evidencia que há uma concordância na localização delas entre os modelos, exceto na depressão topográfica 6 que não foi identificada na análise do MDS.

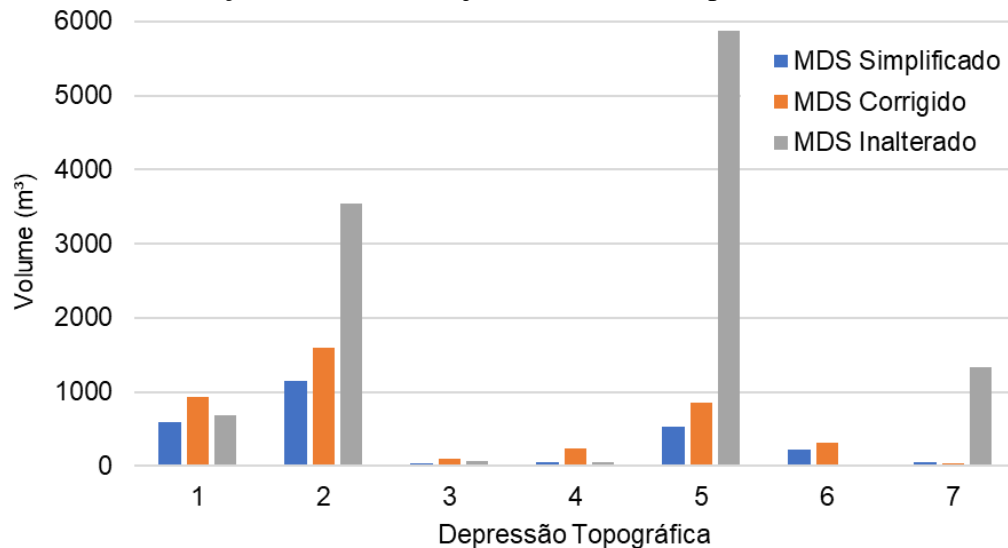
Os gráficos apresentados nas Figuras 28 e 29 mostram os valores de áreas e volumes para as depressões topográficas numeradas na Figura 26. Através delas, é possível perceber uma proximidade nos valores entre de área e volume das depressões identificadas no MDS simplificado e corrigido. A Raiz Quadrada do Erro Médio (no inglês *Root Mean Square Error* – RMSE) entre esses dois modelos é 206,69 m<sup>2</sup> e 255,45 m<sup>3</sup>.

Figura 28 – Área das depressões topográficas do MDS Simplificado, Corrigido e sem alteração nas cores laranja, cinza e azul, respectivamente



Na comparação entre o MDS Corrigido e o MDS e o MDS Simplificado e o MDS se obtiveram os valores de 2561,28 m<sup>2</sup> e 2264,85 m<sup>3</sup> e 2514,89 m<sup>2</sup> e 2447,75 m<sup>3</sup> para o RMSE da área e volume, respectivamente. Dessa forma, é evidente que um distanciamento dos modelos simplificado e corrigido com o MDS, sobretudo nas depressões topográficas 2, 5 e 7, onde são identificados três *outliers*. Essa disparidade pode ser explicada pela grande quantidade de obstáculos nas vias do MDS, além da não modelagem das aberturas de fluxo das galerias nesse modelo.

Figura 29 – Volume das depressões topográficas do MDS Simplificado, Corrigido e sem alteração nas cores laranja, cinza e azul, respectivamente



Essa tendência também é confirmada através da comparação da rede de drenagem, onde a Figura 27 (a) mostra o sentido do fluxo superficial do MDS Simplificado e Corrigido convergindo para R. Antônio Gurjão em direção à feira livre, enquanto no MDS o fluxo se direciona para a R. 7 de Setembro. Isso também é percebido pela Figura 27 (b) cujo fluxo vindo dessa rua conflui para a R. Francisco Marçal e, posteriormente, para o rio Apodi, enquanto o MDS Simplificado e Corrigido direciona as águas pluviais para a região da feira livre na R. Bevenuto Fialho.

A Figura 27 (c) ilustra o fluxo ao longo dessa rua, onde este é direcionado para galeria de drenagem e, logo depois, para o rio Apodi através do MDS Simplificado e Corrigido. Entretanto, rede de drenagem do MDS só está presente na porção Norte dessa região e o fluxo possui sentido contrário aos outros modelos.

Nas Figuras 27 (d) e (e) são ilustradas as redes de drenagem nas ruas Getúlio Vargas e Hipólito Cassiano. Nelas, identifica-se um cenário semelhante, onde as linhas de fluxo do MDS Simplificado e Corrigido passam pela galeria de drenagem da R. Getúlio Vargas, enquanto no MDS elas não são direcionadas para a depressão topográfica 5.

Nesse sentido, a rede de drenagem confirma os resultados do RMSE entre o MDS Simplificado e Corrigido, enquanto esses se distanciam do MDS tanto na área e volume das depressões topográficas, quanto na distribuição da rede de drenagem. Atribui-se essas divergências aos obstáculos temporários (principalmente carros e barracas) nas vias que podem obstruir o fluxo superficial do MDS, mas que não deveriam ser considerados no processamento do relevo da área.

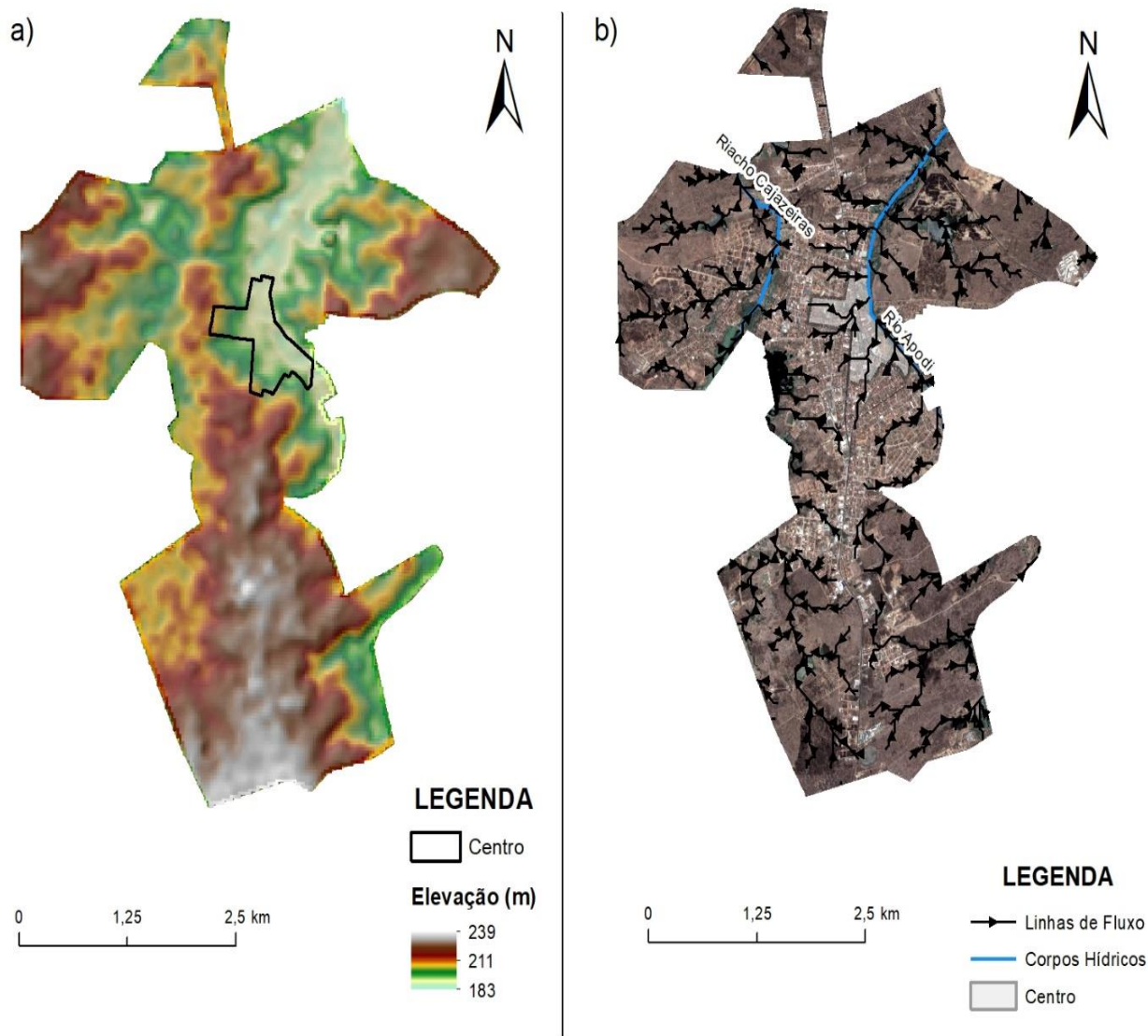
## **4.2 Eventos Extremos de Precipitação e alagamentos na área de estudo**

Por conta de suas fragilidades estruturais e administrativas, Pau dos Ferros sofre com seu histórico de alagamentos. De acordo com registros fotográficos, jornalísticos e os trabalhos de Costa, Lima e Silva (2013) e Silva *et al.* (2019), o Centro da cidade conta com pelo menos 6 localidades que constantemente são submergidas durante o período chuvoso. Essas localidades se situam nas ruas Francisco Marçal, Antônio Gurjão, alguns trechos da Av. Independência (BR-405), além da Rua Getúlio Vargas, Bevenuto Fialho e Hipólito Cassiano, estando todas elas contidas nas depressões topográficas identificadas no Tópico 4.1.

O centro da cidade, onde se situa boa parte da área de estudo, é uma das localidades mais vulneráveis. Através da Figura 30 (a), nota-se que essa região está alocada em um dos pontos mais baixos da área urbana, principalmente se comparada com os bairros adjacentes que possuem pelo menos 10 a 15 metros de diferença altimétrica.

Além disso, há uma convergência na rede de drenagem para o centro da cidade (Figura 30 – b). As edificações e os arruamentos servem como barreiras para o caminho das águas pluviais, provocando o seu acúmulo nas depressões topográficas formadas devido à falta ou ineficiência dos elementos de microdrenagem disponíveis (LIMA et al., 2019).

Figura 30 – Região urbana de Pau dos Ferros: (a) Modelo Digital de Elevação; (b) Rede de fluxo das águas pluviais



Nesse contexto, a R. Bevenuto Fialho se destaca por produzir grandes quantidades de resíduos sólidos e de varrição urbana provenientes da feira livre que, quando não obstruem o dispositivo de drenagem existente, são carreados diretamente para o rio Apodi na ocorrência de um alagamento. Sendo assim, além de impactar a qualidade de seu recurso hídrico, nesse acontecimento a lâmina de água frequentemente invade as edificações residenciais e comerciais de seu entorno, promovendo risco de doenças (FREITAS; XIMENES, 2012) e perigo devido a velocidade considerável do escoamento.

Essas fragilidades urbanas e a exposição da população ao risco são mais evidentes na ocorrência de EEP. Embora não existam estudos que determinem o valor desse limiar para a cidade de Pau dos Ferros, Santos *et al.* (2014) definiram as precipitações prováveis para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 e 500 anos, sendo estes 43, 75, 113,50, 159,69, 203,99, 261,33, 304,31 e 403,61 mm de precipitação diária acumulada com base no monitoramento pluviométrico entre os anos de 1964 a 2011.

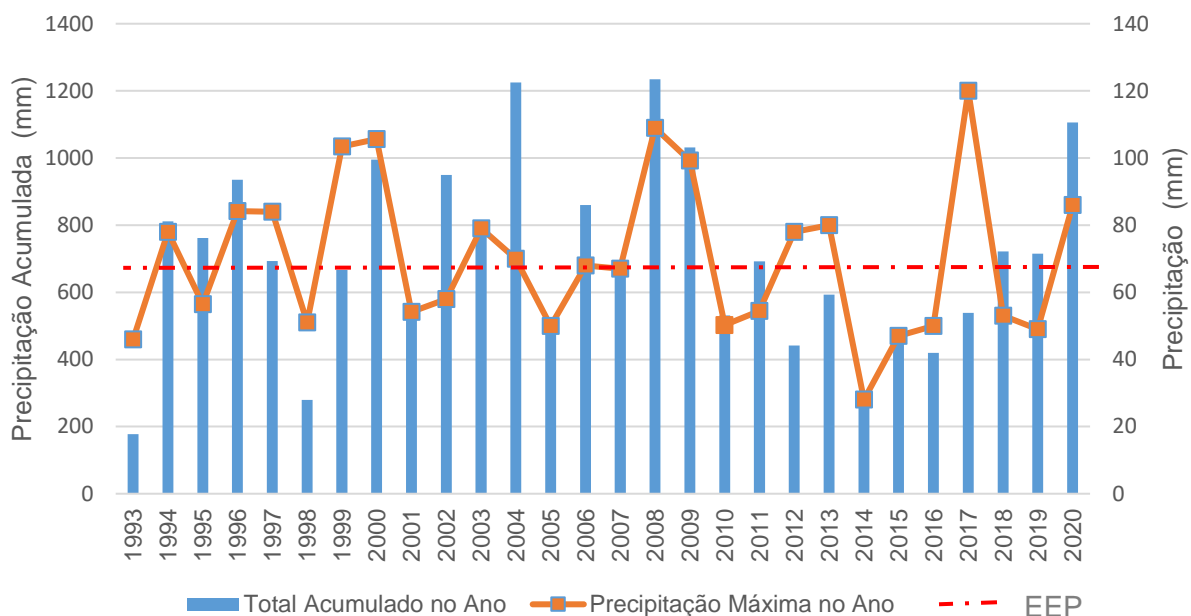
Entre as metodologias para identificação de EEP uma das mais utilizadas é a análise estatística de dados históricos de pluviosidade em quantis que, através da análise de tendência de Mann-Kendall, define qual o percentil, isto é, a precipitação diária ou acumulada que caracteriza o limiar de um EEP, como usado por Amorim *et al.* (2019) e Pereira e Nunes (2018).

Amorim *et al.* (2019) verificaram que eventos com precipitação maior ou igual a 70 mm (percentil 98) se configuram como EEP em Natal/RN. Nessa mesma localidade, Lima (2019) afirma que precipitações maiores que 100 mm apresentam grande potencial de dano para o ambiente urbano, mas acrescenta que valores de 10 mm já podem causar alagamento desde ocorram um curto período.

Para Pereira e Nunes (2018), as precipitações acumuladas em 48 horas (percentil 75) de 53,5, 80,5, 84,0 e 76,9 mm nas cidades de Porto Alegre/RS, Pelotas/RS, Caxias do Sul/RS e Santa Maria/RS, respectivamente, podem se refletir em sérias consequências, como deslizamentos de terra com a perda de habitações. Campos, Mota e Santos (2015) estudando os extremos de precipitação para Belém (PA) verificaram que um volume de 24 mm diário (percentil 90) comumente acontecem e causam grandes transtornos na cidade, sendo os mais comuns os alagamentos e a falta de energia.

Nesse sentido, com base no histórico de precipitação disponibilizado pela EMPARN entre os anos de 1993 e 2020, a precipitação máxima média foi de 69,95 mm, valor aproximado ao obtido por Santos *et al.* (2014). Além disso, ocorreram 19 eventos em que o volume pluviométrico diário foi superior a 70 mm (AMORIM, 2019) e 51 ocorrências em que o acumulado em 48 horas foi superior 80,5 mm, caracterizando situação de alerta como destacado por Pereira e Nunes (2018).

Figura 31 – Gráfico de precipitação acumulada anual e precipitação máxima entre a série histórica de 1993 a 2020



Fonte: Adaptado de EMPARN (2020).

A Figura 31 evidencia que na série histórica de dados de pluviosidade considerada (1993-2020), as maiores precipitações não necessariamente ocorreram nos anos mais chuvosos. Em 2017, por exemplo, o volume de precipitação anual (538,5 mm) foi abaixo da média (698,31 mm), enquanto em um dia choveu 120 mm, valor 71,4% superior da média anual das precipitações máximas de Santos *et al.* (2014). Além disso, verifica-se também que a média anual das precipitações máximas é de 74 mm, valor acima do limiar considerado por Amorim *et al.* (2019) para ocorrência de EEP no litoral oriental no RN.

Com base nos acontecimentos de alagamento noticiados ou registrados na internet, a precipitação acumulada de 40 mm/dia já propicia a ocorrência de severos alagamentos em Pau dos Ferros. Esse fato ainda é confirmado através do Quadro 1, onde o acontecimento é descrito e identificado quanto a sua data e o volume acumulado de chuva no dia.

Quadro 1 – Registros noticiados ou presentes na internet da ocorrência de alagamentos em Pau dos Ferros, relacionando-o a precipitação no referido dia do acontecimento

<b>Data</b>	<b>Registro Pluviométrico (mm)</b>	<b>Acontecimento Registrado ou Noticiado</b>
06/07/2020	43	Alagamento na R. Getúlio Vargas. Elevação da lâmina de água 60 cm, sendo responsável por invadir edificações e danificar veículos <sup>(1)</sup>
04/03/2020	68	Alagamento na R. Getúlio Vargas. A velocidade do escoamento das águas pluviais provocou a subsidência da pavimentação asfáltica <sup>(2)</sup>
27/01/2019	40	Alagamento nas ruas Getúlio Vargas, Hipólito Cassiano e Bevenuto Fialho. A força das águas arrastou as barracas da feira livre e colocou os comerciantes em risco <sup>(3)</sup>
09/01/2019	49	Forte chuva provocou uma enxurrada nas ruas Antônio Gurjão e Bevenuto Fialho. Uma pessoa foi levada pelo fluxo do escoamento sendo salvo por moradores <sup>(4)</sup>
18/02/2017	120	Maior volume diário de chuva em 20 anos. A localidade mais afetada foi a R. Bevenuto Fialho. A obstrução do dispositivo de drenagem provocou a maior elevação da lâmina de alagamento registrada que submergiu calçadas com mais de 70 cm de altura <sup>(5)</sup>

Fonte: (1) <https://www.grandeponto.com.br/noticia/video-chuva-forte-alaga-ruas-em-pau-dos-ferros>; (2) <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/regiao/chuvas-causam-alagamentos-e-destruicoes-no-interior-do-ce-1.971774>; (3) <https://www.blogdobg.com.br/foto-e-video-fortes-chuvas-chegam-a-pau-dos-ferros-e-municipios-proximos/>; (4) <https://www.youtube.com/watch?v=I9fgFN1Z7R0>; (5) <https://www.youtube.com/watch?v=eSUTybS5cxU>

Nesses eventos de precipitações intensas que acometeram Pau dos Ferros, o Quadro 1 aponta que as ruas Bevenuto Fialho, Getúlio Vargas e Hipólito Cassiano acumulam uma grande parcela das águas pluviais cuja confirmação é dada devido a elas se situarem em meio as depressões topográficas 1, 5 e 7, respectivamente, deste trabalho.

As ruas mencionadas possuem em sua grande maioria edificações residenciais, geralmente são pavimentadas com asfalto, exceto na Hipólito Cassiano, onde o pavimento empregado são paralelepípedos. Além disso, por se situar na região central da cidade, todas são repletas de um intenso tráfego, sobretudo a Av. Independência, e as ruas Getúlio Vargas e Bevenuto Fialho, conforme apresentado nas caracterizações do Quadro 2.

Quadro 2 – Caracterização dos pontos de alagamento no centro da cidade de Pau dos Ferros

<b>Ponto de Alagamento</b>	<b>Caracterização da Localidade</b>
Rua Getúlio Vargas	Predominância de edificações comerciais. Possui um intenso trânsito de veículos e pessoas devido aos supermercados e bancos existentes na localidade
Rua Bevenuto Fialho	Predominância de edificações comerciais. É a rua principal da feira livre e, por esse motivo, possui intenso movimento diariamente
Rua Francisco Marçal	Predominância de edificações comerciais. É um prolongamento da feira livre da R. Bevenuto Fialho
Rua Antônio Gurjão	Predominância de edificações comerciais. É um prolongamento da feira livre da R. Bevenuto Fialho
Avenida Independência	Possui edificações comerciais e residenciais. Possui um intenso trânsito por representar a principal rodovia que liga a cidade aos demais municípios da região
Rua Hipólito Cassiano	Predominância de edificações residenciais. Diferencia-se das demais ruas por não possuir pavimento asfáltico, mas em paralelepípedo

Um fator agravante dessa problemática é a fragilidade das componentes de saneamento ambiental. Nesse contexto, percebe-se que a quantidade de dispositivos de microdrenagem na área de estudo é insuficiente, contando com apenas duas galerias para passagem das águas pluviais que direcionam o fluxo para as proximidades da calha do rio Apodi, sendo uma nas ruas Bevenuto Fialho (Figura 32 – a) e Getúlio Vargas (Figura 32 – b), e duas bocas de lobo na Av. Independência (Figura 32 – c) e R. Getúlio Vargas (Figura 32 – d).

Além disso, é perceptível a obstrução parcial ou completa dos dispositivos de drenagem existentes. Através da Figura 32 (a), nota-se que a galeria de drenagem na região da feira livre se mostra parcialmente obstruída pelos resíduos sólidos da feira livre, enquanto a da Figura 32 (b) apresenta obstrução parcial pelos veículos que ficam estacionados na frente de sua abertura ou até mesmo em seu interior. A Figura 32 (d), por outro lado, ilustra a obstrução completa da boca de lobo pela própria população.

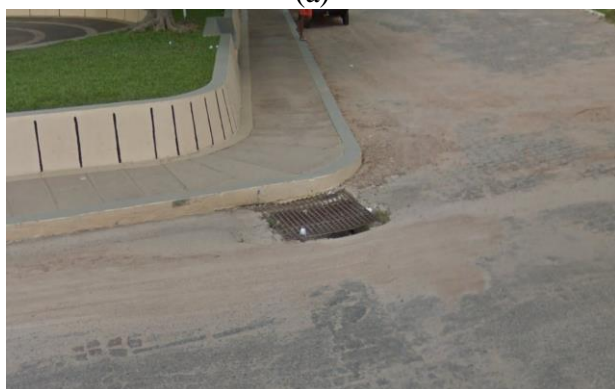
Figura 32 – Galeria de drenagem das águas pluviais: (a) R. Bevenuto Fialho e (b) R. Getúlio Vargas. Bocas de lobo: (c) R. Getúlio Vargas e (d) Av. Independência (BR-405)



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autor (2021).

Um cenário de má gestão dos componentes de saneamento semelhante a este é vivenciado por Silva *et al.* (2018) nos bairros Manaíra, Tambaú e Cabo Branco, em João Pessoa/PB cuja ocorrência de alagamentos são atribuídos a carência de dispositivos de drenagem e ao parcelamento do solo desplanejado. Moraes e Silva (2019), na microbacia do córrego Quarta-Feira em Cuiabá/MT, verificaram que 45% das bocas de lobo possuíam problemas de obstrução por resíduos e sedimentos e atribuem essa problemática ao manejo inadequado dos serviços de drenagem.

### 4.3 Simulação dos Alagamentos

O MDS utilizado na simulação dos alagamentos foi o corrigido em função dele apresentar características próprias dos dados originais do processamento aerofotogramétrico, preservando a altura das edificações e calçadas, por exemplo, além de representar bem o fluxo superficial real

que, em sua maior parte, é direcionado para as galerias de drenagem das ruas Bevenuto Fialho e Getúlio Vargas.

Nesse sentido, através da Figura 33, percebe-se que a R. Bevenuto Fialho (depressão topográfica 1) não possui dispositivo de drenagem eficiente, visto que para as águas pluviais começarem a escoar pela galeria de drenagem se forma uma lâmina de alagamento de pelo menos 70 cm de altura, assim como evidenciado no perfil topográfico CD, uma elevação suficiente para invadir as edificações e causar prejuízos.

Apesar da galeria estar próxima a depressão topográfica, ela não é o dispositivo de drenagem mais eficiente para essa situação. Nesse caso, é importante a disposição de uma boca de lobo no limite das calçadas entre a distância 60 e 70 m do perfil topográfico AB, de modo a direcionar as águas pluviais para a macrodrenagem (Rio Apodi) sem a ocorrência do acúmulo na via.

Na Figura 34 é apresentada a evolução do alagamento na depressão topográfica 2. Nela é evidente a elevação da lâmina em pelo menos 90 cm em relação aos pontos mais baixos da depressão para que atinja o instrumento de drenagem mais próximo (boca de lobo da Av. Independência). Dessa forma, a localidade mais afetada é a R. Antônio Gurjão, se situa entre a distância 70 e 80 m do perfil topográfico CD, ponto mais baixo da zona de acumulação.

Figura 33 – Simulação de alagamento na Depressão Topográfica 1 com perfil topográfico longitudinal (AB) e transversal (CD)

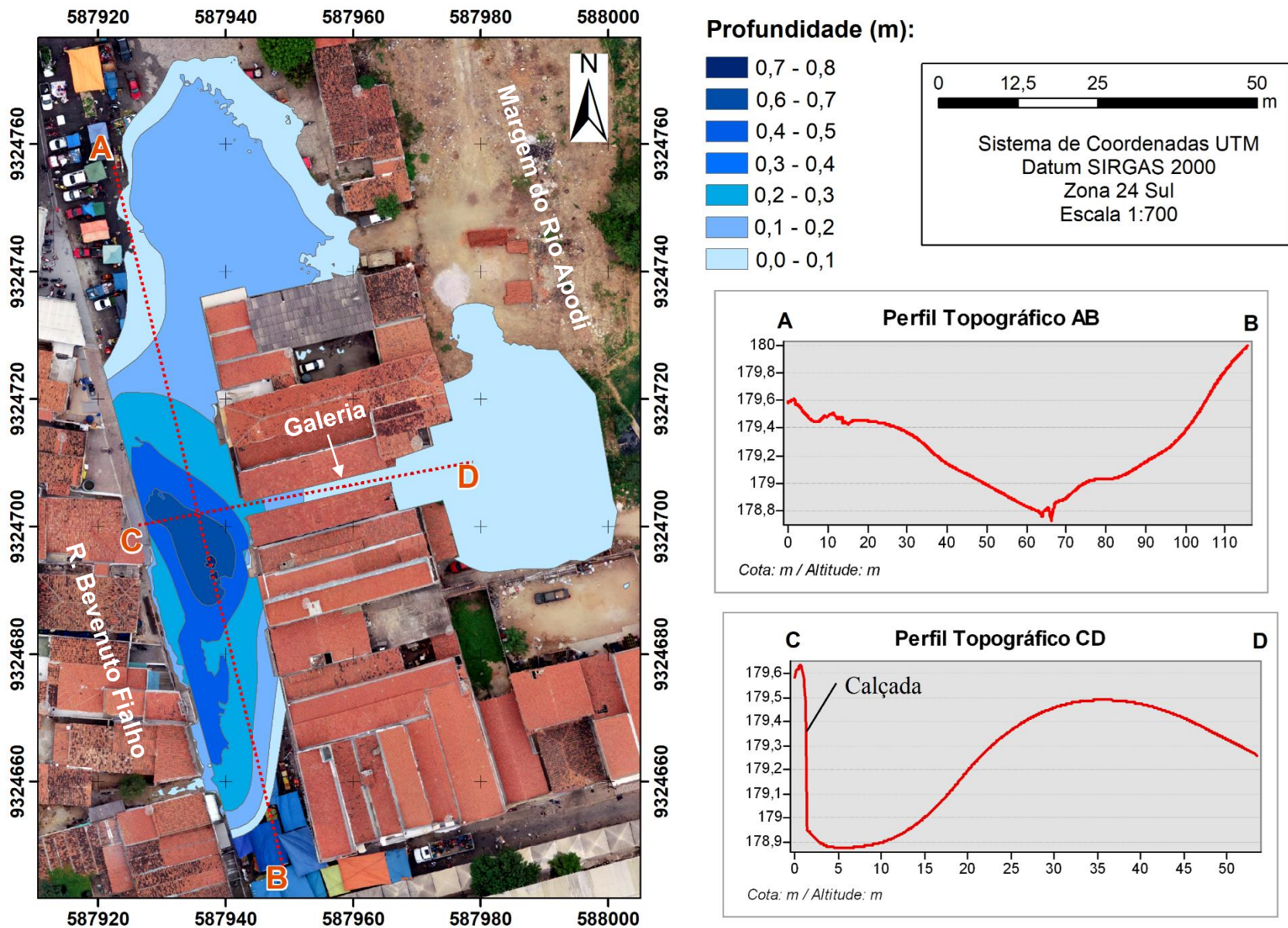


Figura 34 – Simulação de alagamento na Depressão Topográfica 3 com perfil topográfico longitudinal (CD) e transversal (AB)

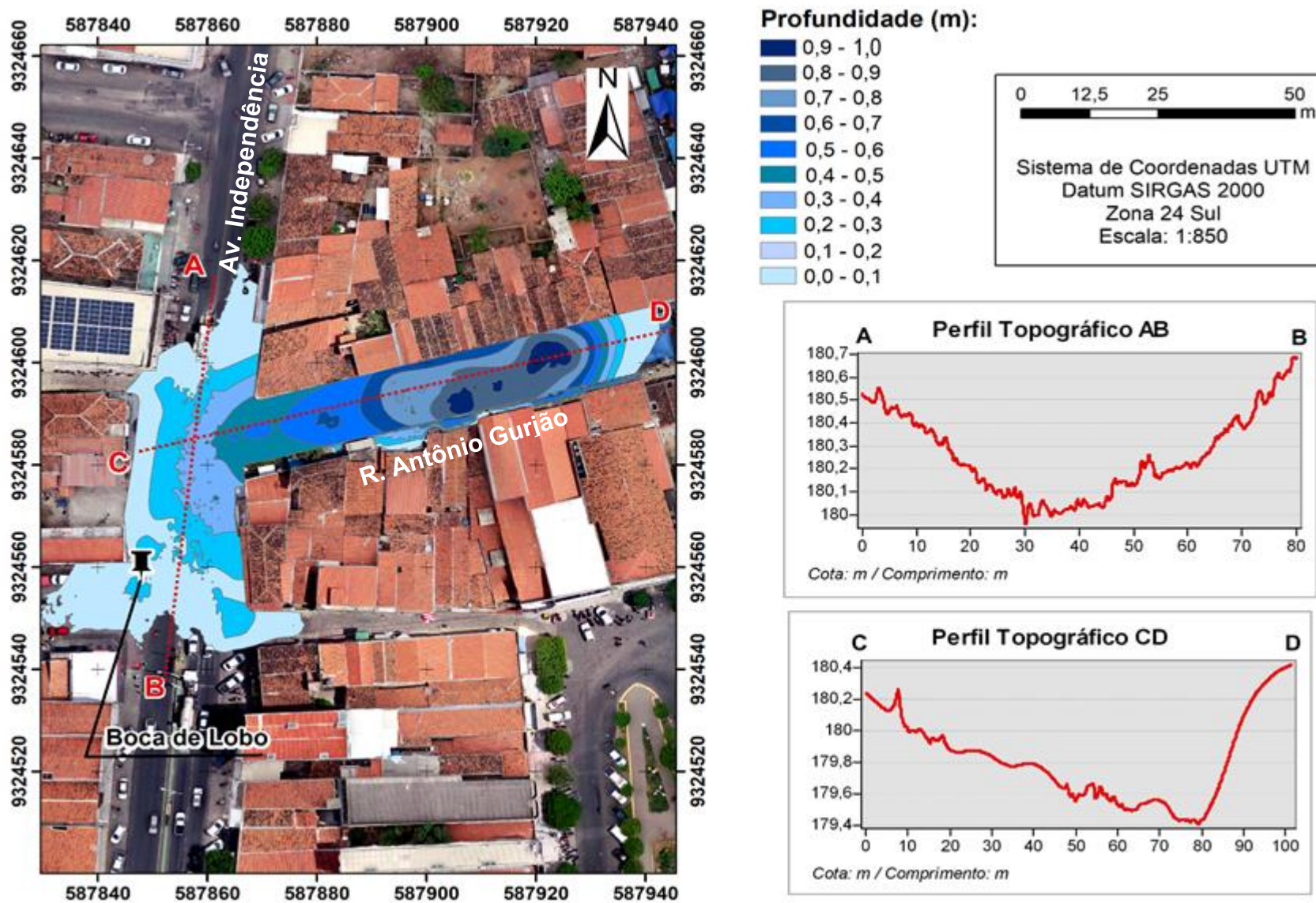
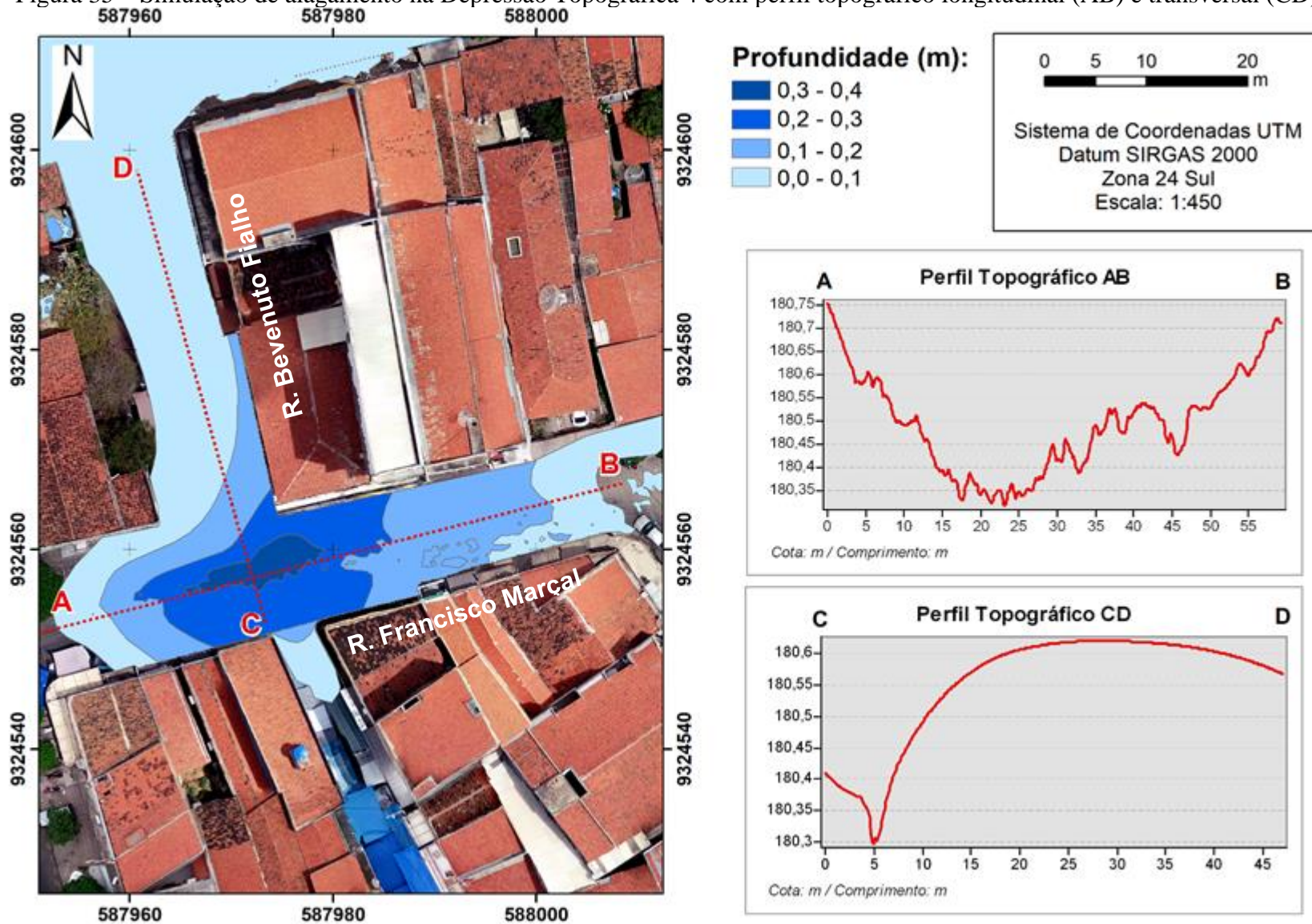


Figura 35 – Simulação de alagamento na Depressão Topográfica 4 com perfil topográfico longitudinal (AB) e transversal (CD)



Na R. Francisco Marçal o cenário é semelhante (Figura 35). Os perfis topográficos AB e CD evidenciam que nessa localidade há formação de uma lâmina de alagamento de pelo menos 30 cm. Apesar desse valor ser inferior aos demais apresentados nas Figuras 33 e 34, as calçadas das edificações nessa localidade são mais baixas e toda região fica alagada nas chuvas intensas, pois como não existe dispositivo de drenagem, a lâmina de alagamento se eleva até ser direcionada para a R. Bevenuto Fialho.

Através de um vídeo registrado do dia 18/02/2017 (YOUTUBE, 2021) em que o acumulado diário de precipitação foi de 120 mm (Quadro 1), verificou-se uma lâmina de alagamento com altura de 73 cm acima do nível da via (Figura 22 – c). Por meio do MDS corrigido, obteve-se uma elevação de 179,95 m na localidade onde foi realizada a aferição, totalizando assim uma altitude de alagamento de 180,68 m.

A Figura 36 mostra que as regiões afetadas por alagamento na elevação de 180,68 m compreendem as depressões topográficas 1, 2, 3 e 4. Nelas, é perceptível que todo o fluxo que passa pelas depressões topográficas conflui para a R. Bevenuto Fialho, onde ocorre a feira livre. Devido a inexistência de instrumentos de drenagem, as águas pluviais se empoçam até o momento em que chegam na galeria de drenagem e são direcionadas para o rio Apodi.

Através da Figura 36 se nota que grande parte da população situada no recorte está submetida ao risco de alagamento, pois na ocorrência do fenômeno a elevação do nível da água chega a superar 1 metro em relação ao pavimento em algumas localidades. Dessa forma, as águas empoçadas invadem as edificações, sobretudo as localizadas nas ruas Bevenuto Fialho e Antônio Gurjão.

Além delas, os vendedores ambulantes da feira livre que alocam suas barracas nas vias estão submetidos a mesma condição, conforme confirmado nos registros das Figuras 37 (a) e (b). Por meio delas são evidenciados os prejuízos na localidade que são produzidas grandes quantidades de resíduos que tendem a agravar a problemática do alagamento.

Figura 36 – Delimitação da extensão afetada pela lâmina de alagamento com elevação de 180,68 m

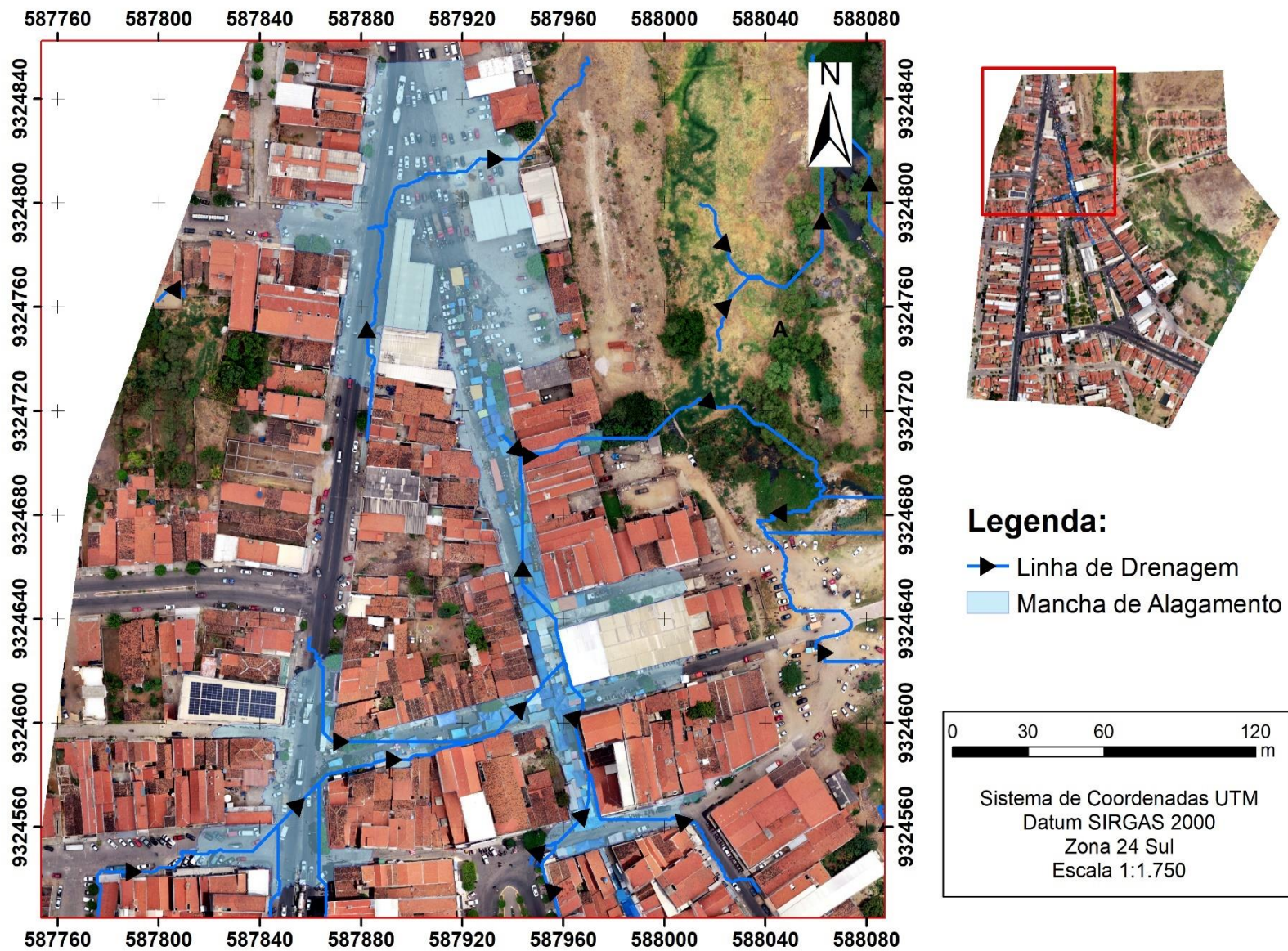


Figura 37 – a) Alagamento na feira livre (R. Bevenuto Fialho); b) Barracas e ambulantes submetidos ao risco ao alagamento



(a)

(b)

Fonte: Youtube (2021).

As depressões topográficas 5 e 6 também vivenciam cenário semelhante. A Figura 38 mostra a galeria situada entre as depressões topográficas 5 e 6, onde se constata que para direcionar as águas pluviais da R. Getúlio Vargas para a Dom Pedro II há a formação de uma lâmina de alagamento de pelo menos 50 cm. Essa tendência é confirmada por meio do perfil topográfico CD cuja elevação do terreno cresce na direção da galeria.

Na R. Dom Pedro II, onde se localiza a depressão topográfica 6 (Figura 39), verifica-se que antes de serem direcionadas para o rio Apodi, as águas pluviais provenientes dos baixios adjacentes se empoçam de modo a formar uma lâmina de alagamento de pelo menos 70 cm. O perfil topográfico CD evidencia que a margem do corpo hídrico é mais elevada que o nível da via, enquanto no AB se verifica que as elevações a Norte e a Sul do vale da depressão são mais elevadas.

Com base nos fatos levantados e nos registros fotográficos do EEP ocorrido no 18/02/2017, aferiu-se *in loco* 54 cm de lâmina de alagamento cujo valor foi verificado pela mancha na parede da galeria. Através do MDS corrigido na mesma localidade se obteve uma elevação de terreno de 180,44 m, totalizando assim uma altitude de alagamento de 180,98 m (Figura 40).

Figura 38 – Simulação de alagamento na Depressão Topográfica 5 com perfil topográfico longitudinal (AB) e transversal (CD)

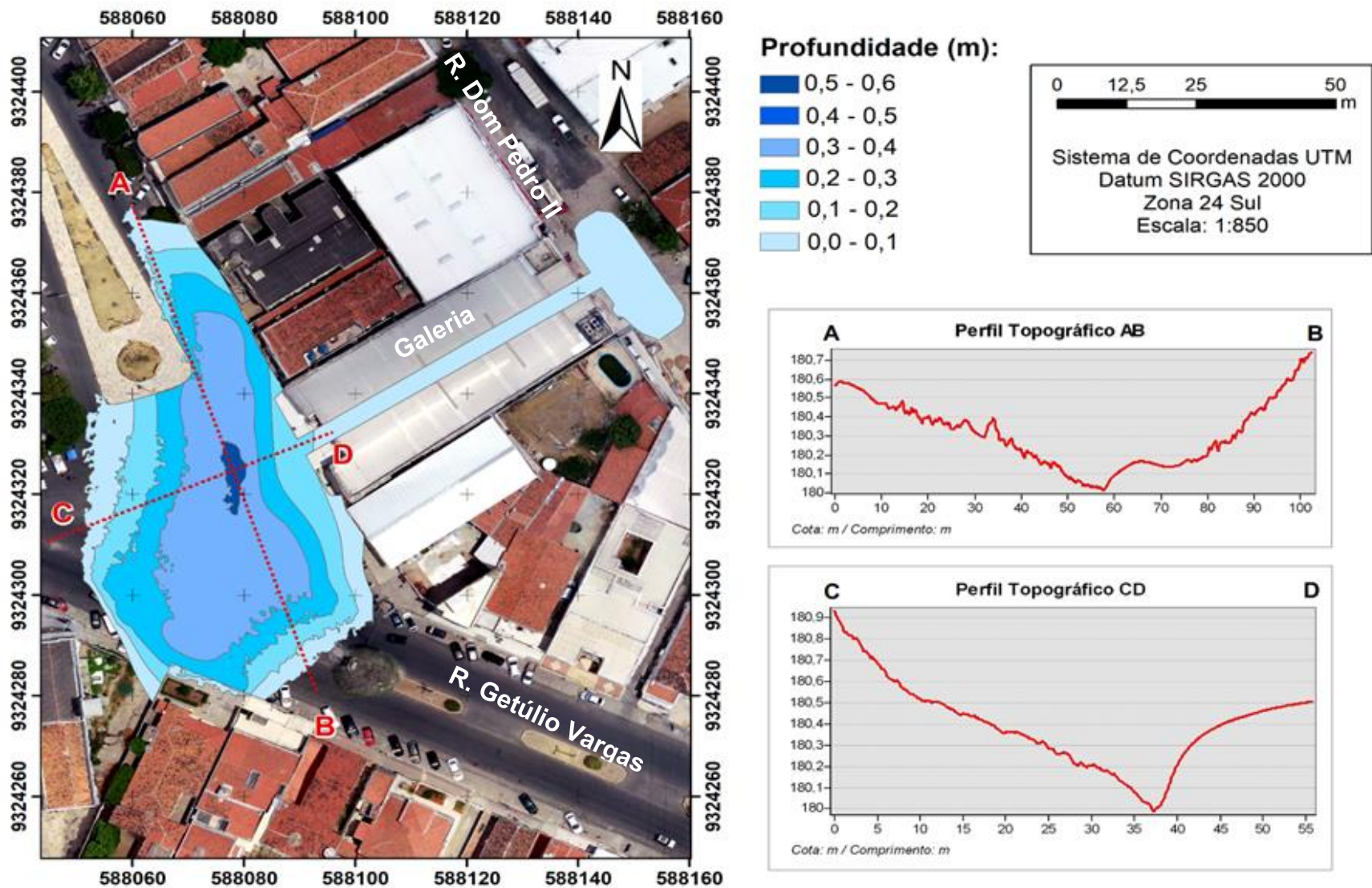


Figura 39 – Simulação de alagamento na Depressão Topográfica 6 com perfil topográfico longitudinal (AB) e transversal (CD)

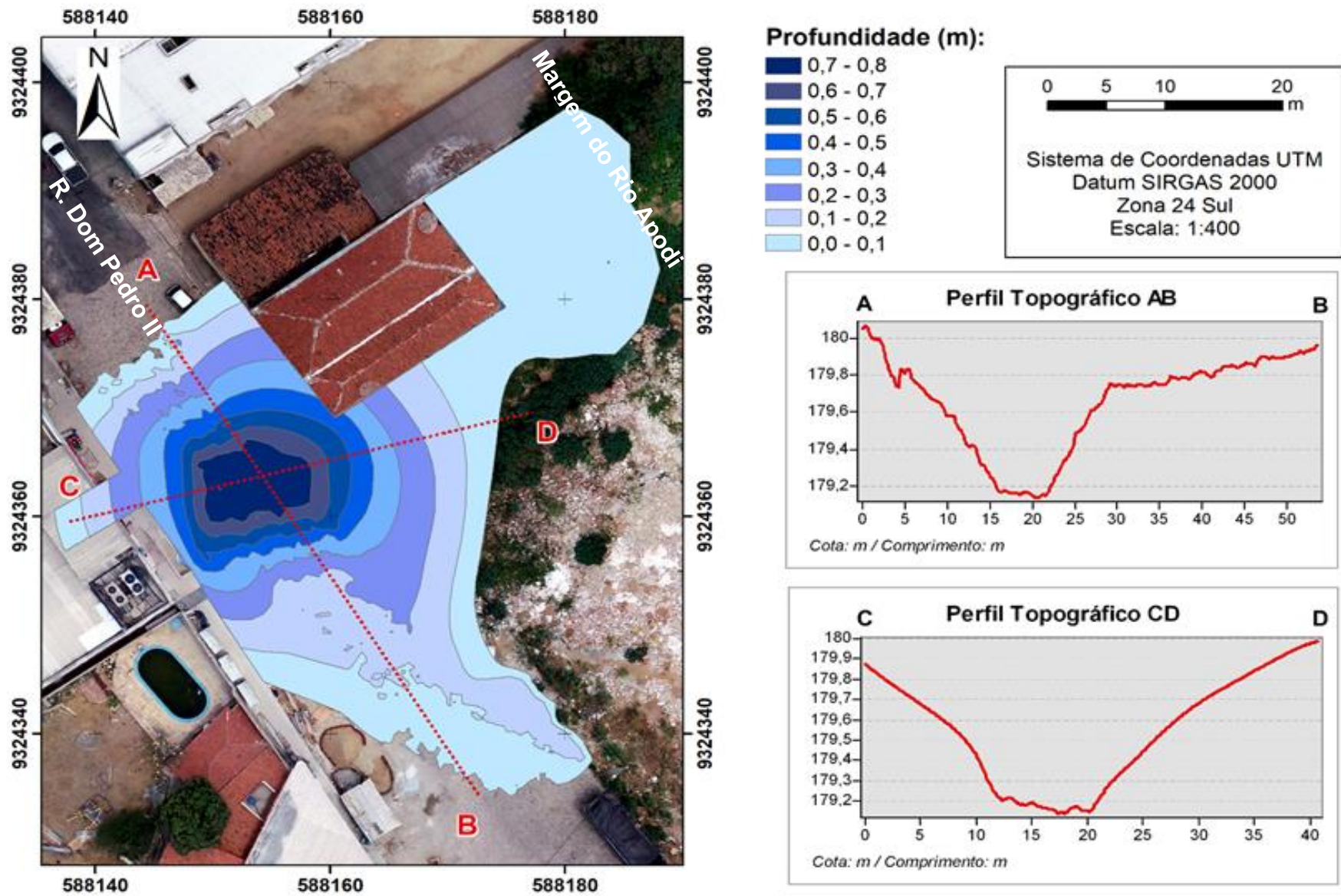
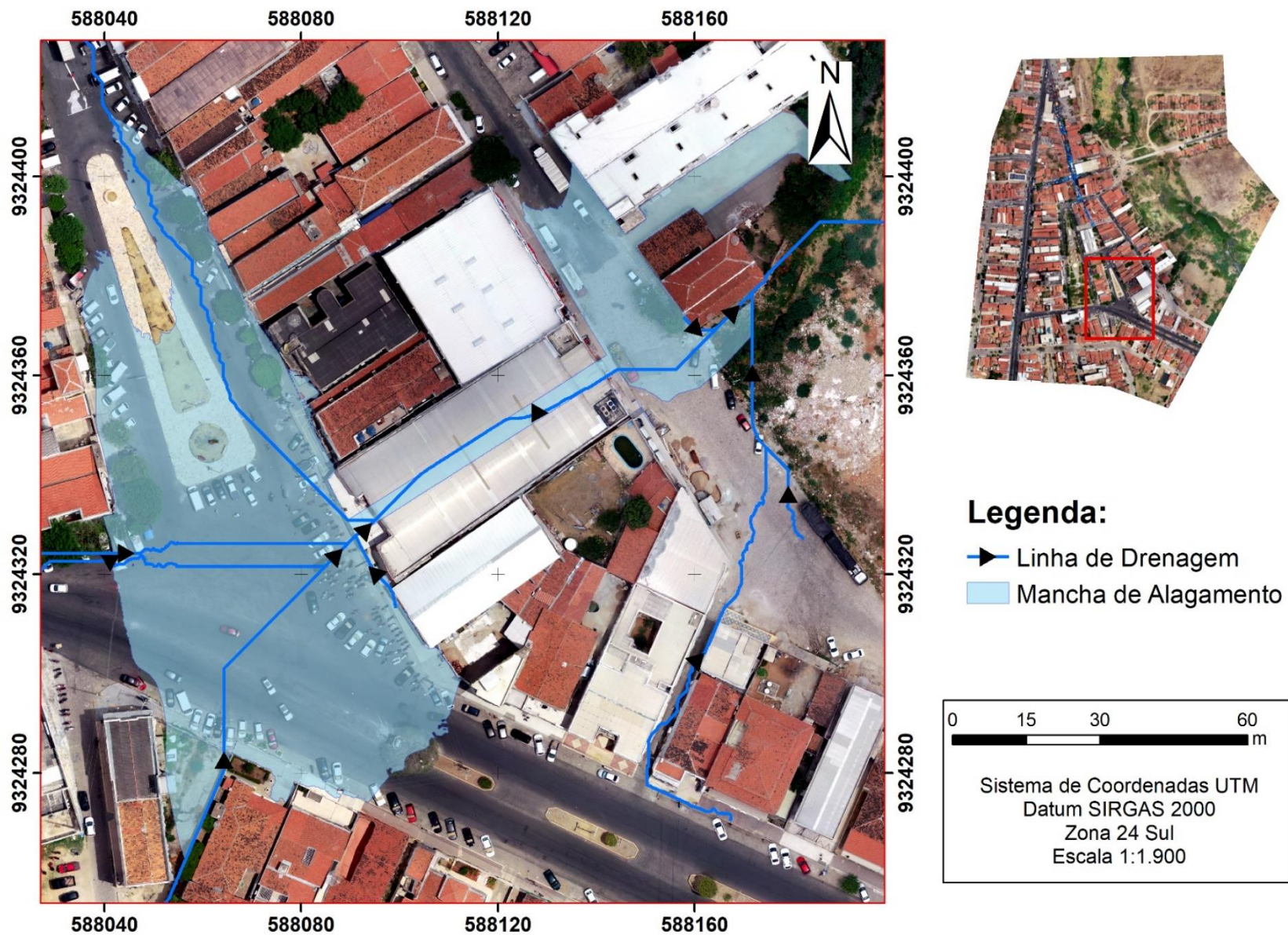


Figura 40 – Delimitação da extensão afetada pela lâmina de alagamento com elevação de 180,98 m



A Figura 40 mostra que o fluxo superficial das águas pluviais ocorre da depressão topográfica 7 para a 5 e, posteriormente, para a 6, onde são verificadas as regiões mais afetadas pela ocorrência do fenômeno. Além disso, as redes de drenagem das microbacias formadas no entorno do referido recorte espacial confluem para a galeria de drenagem. Nessa ocasião, as depressões topográficas 5 e 6 são completamente preenchidas e todo o entorno da galeria de drenagem é submetido ao risco ao alagamento. Ademais, é notório grande quantidade de edificações e veículos que estão situados na extensão do alagamento.

Com fluxo de trabalho semelhante, Lima *et al.* (2019) verificaram que no bairro do Tirol em Natal existem duas depressões topográficas na escala de detalhe de 1:5.000 que são responsáveis pelo alagamento na região. Com base nisso, eles verificaram que, em relação ao vale da depressão, a lâmina de alagamento chegou a possuir altura de 2,5 m, de modo que a maior parte das edificações do recorte espacial estudado por eles foi caracterizado como alto risco ao alagamento.

As situações presenciadas nessa pesquisa, assim como em Lima *et al.* (2019), concordam com muitas outras cidades do Nordeste brasileiro cujo clima é vulnerável a extremos hidrometeorológicos de longas secas e, por vezes, intensas chuvas (RUFINO *et al.*, 2021). Nelas, a ausência de um plano diretor que trata do parcelamento do solo e da governança das águas em relação às componentes de drenagem propicia a ocorrência dos alagamentos em meio a um ambiente desplanejado.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os alagamentos urbanos foram estudados nesse trabalho com base em dados obtidos adquiridos por um VANT. Dessa forma, procurou-se contextualizar os seus resultados cartográficos com base nas observações *in loco* da ocupação urbana, infraestrutura de microdrenagem e da ocorrência de alagamentos registrados ou noticiados, localidade responsável por sediar a maior parte da atividade econômica de Pau dos Ferros e de sua microrregião homônima.

Embora possua destaque econômico em sua região, Pau dos Ferros é carente de planejamento urbano e apresenta vários traços da má gestão quanto aos recursos de drenagem urbana. Sendo assim, a fim de investigar essa problemática, analisou-se a dinâmica do fluxo superficial das águas pluviais em seu ambiente urbano e, em função da escala dos resultados produzidos, delimitou-se recorte espacial de interesse situado em sua região central que, além de se estabelecer em um baixio, sediou um processo histórico de instalações de edificações em pontos de confluência de fluxo, de forma a gerar depressões topográficas propícias a ocorrência dos alagamentos.

A metodologia consistiu na elaboração de três MDEs: o MDS obtido diretamente pelo processamento fotogramétrico das imagens aéreas e dos dados de GNSS (inalterado), além dos modelos Simplificado, proposto por Lee *et al.* (2016), e corrigido. Estes dois últimos são oriundos de técnicas de remoção de obstáculos não permanentes nas vias e que podem vir a interferir nos resultados da rede de drenagem final, bem como a simulação das galerias de drenagem que conduzem o fluxo das águas ao rio Apodi.

Dessa forma, foi constatado que o MDS inalterado produziu resultados que divergem da situação observada *in loco*, além de possuir um maior RMSE em relação aos outros dois modelos. O MDS Simplificado e Corrigido produziram resultados semelhantes quanto a rede drenagem e a quantidade, localização e extensão das depressões topográficas, com RMSE de 206,69 m<sup>2</sup> e 255,45 m<sup>3</sup> para área de volume, respectivamente.

Na análise pluviométrica, com base nos dados da EMPARN entre 1993 e 2020 houve 17 ocorrência de chuvas com potencial danoso a infraestrutura urbana cujas precipitações diárias superou 70 mm, valor considerado por Amorim *et al.* (2019) para um EEP. Entretanto, por meio

de registros fotográficos e notícias disponibilizadas na internet se verificou que precipitações acima de 40 mm já promove alagamentos e causa severos transtornos.

Nesse sentido, com base nas observações *in loco* do EEP ocorrido no dia 18/02/2017, as ruas mais vulneráveis ao alagamento são: Bevenuto Fialho, Antônio Gurjão, Getúlio Vargas, Hipólito Cassiano, Dom Pedro II e um pequeno trecho da Av. Independência. Como nessas vias existem apenas duas bocas de lobo e duas galerias de direcionamento de fluxo, fica evidente a má gestão da drenagem urbana em Pau dos Ferros.

Por apresentar elementos originais na região das edificações pela utilização do MDS e do terreno sem interferência de obstáculos nas vias por meio do MDT, o modelo escolhido para realização das simulações de elevação da lâmina de alagamento foi o MDS Corrigido. Nele foram identificadas 7 depressões topográficas e modeladas duas galerias de drenagem que podem visualizadas *in loco*.

Nessas depressões foi constatado a má alocação de instrumentos de drenagem presentes ou até mesmo sua inexistência, impactando no potencial de acumulação das águas pluviais em toda sua extensão. A exemplo disso, na depressão topográfica 2 a lâmina de alagamento chegou a atingir 90 cm de profundidade para que a boca de lobo pudesse começar a captar o fluxo. Em outros casos, como na depressão topográfica 4, as águas pluviais acumuladas só passam a escoar para outras localidades após uma lâmina de 30 cm de profundidade.

Recomenda-se para trabalhos futuros os seguintes tópicos:

- Implementar soluções de engenharia para minimização da problemática explanada neste trabalho;
- Analisar modelos digitais de elevação com diferentes alturas de sobrevoo e sobreposição a fim de verificar os parâmetros ótimos de voo para modelagens hidrológicas estáticas.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO (ANAC). **Requisitos Gerais Para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil. REGULAMENTO BRASILEIRO DA AVIAÇÃO CIVIL ESPECIAL (RBAC-E nº) 94**, 2017.

AGUIAR, L. DE S.; AMARO, V. E.; ARAÚJO, P. V. DO N.; SANTOS, A. L. S. Geotecnologias de baixo custo aplicadas à avaliação de risco por inundação em áreas urbanas costeiras em cenários de mudanças climáticas. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n. 4, p. 267-290, 2019.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G.. Köppen's climate classification map for Brazil, **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI 10.1127/0941-2948/2013/0507.

AMORIM, A. C. B.; SCUDELARI, A. C.; AMARO, V. E. A.; MATOS, M. F. A. Variabilidade dos Extremos de Precipitação Diária na Cidade de Natal, Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 4, p. 284-295, 2019.

AMORIM, A. C. B. *et al.* Regionalização e Análise da Tendência da Precipitação do Rio Grande do Norte Associados a Padrões de TSM. **Rev. bras. meteorol.**, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 269-280, 2020.

AMORIM FILHO, O. Cidades médias e a organização do espaço no Brasil. **Revista Geografia e Ensino**, Belo Horizonte, v. 2, n. 5, p. 5-34, 1984.

ATHEARN, N.; TAKEKAWA, J.; JAFFE, B.; HATTENBACH, B.; FOXGROVER, A. Mapeamento de elevações de locais de restauração de zonas úmidas de maré na Baía de São Francisco: Comparando a precisão do lidar aéreo com uma eco-sonda de feixe único. **Journal of Coastal Research**, v. 26, n. 2, p. 312–319, 2010.

BARBOSA, Z. N. T.; OLIVEIRA, W. N.; ALVES, P. R. Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas de riscos Estudo de caso: Angra dos Reis -RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), Curitiba. **Anais São José dos Campos: INPE**, 2011. p. 4940-4947, 2011.

BEZERRA, J. A. **A cidade e região de pau dos ferros: por uma geografia da distância em uma rede urbana interiorizada**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual do Ceará, 2016.

BLUMENSAAT, F.; STAUFER, P.; HEUSCH, S.; REUBNER, F.; SCHÜTZE, M.; SEIFFERT, F.; GRUBER, G.; ZAWILSKI, M.; RIECKERMANN, J., Water quality-based assessment of urban drainage impacts in Europe – where do we stand today? **Water Science Technology**, v. 66, p. 304-318, 2012.

BRASIL. MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do ordeste Setentrional: relatório de impactos**

**ambientais - RIMA.** Brasília: BRASIL, 2004. Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/saofrancisco/>. Acesso em: 10 out. 2008.

BUFFON, E.; PAZ, O.; SAMPAIO, T. V. Veículo aéreo não tripulado (VANT) - aplicação na análise de inundações em áreas urbanas. **GOT - Journal of Geography and Spatial Planning**, v.13, n. 5, p. 85-108, 2018. 10.17127/got/2018.13.004.

CAMPOS, T. L. O. B.; MOTA, M. A. S.; SANTOS, S. R. Q. Eventos extremos de precipitação em Belém - PA: uma revisão de notícias históricas de jornais. **Rev. Ambient. Água**, Taubaté, v. 10, n. 1, p. 182-194, Mar. 2015.

CARVALHO, C. C. A. *et al.* Produção urbana no semiárido brasileiro: um estudo sobre Pau dos Ferros, RN, Brasil. **Interações (Campo Grande)**, Campo Grande, v. 20, n. 3, p. 845-860, set. 2019.

CORREIA, E. F. G.; RIBEIRO, G. P.; BAPTISTA, A. C. Modelagem hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Bengalas, Nova Friburgo, RJ, utilizando o potencial de geotecnologias na definição de áreas de risco à inundação. *Revista Brasileira de Cartografia* p. 1183–1202, nov. 2015.

COSTA, F., LIMA, R. F. S.; SILVA, S. M. P. S. Carta de risco de inundação a partir de modelos SRTM na área urbana de Pau dos Ferros - RN. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 17, n. 2, p. 182-198, 2013.

COSTA, M. S.; LIMA, K. C.; ANDRADE, M. M.; GONÇALVES, W. A. Tendências observadas em extremos de precipitação sobre a região Semiárida do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 5, p. 1321-1334, 2015.

DANTAS, J. R. Q.; CLEMENTINO, M. L. M.; FRANÇA, R. S. A cidade média interiorizada: pau dos ferros no desenvolvimento regional. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 11, n. 23, p. 129-148, nov. 2015.

DINIZ, T. M.; PEREIRA, H. C. Climatologia do estado do rio grande do norte, brasil: sistemas atmosféricos atuantes e mapeamento de tipos de clima. **Boletim Goiano De Geografia**, v. 35, n. 3, p. 488–506, 2015.

EMERGENCY EVENTS DATABASE (EM-DAT). **Natural Disasters 2018**: an opportunity to prepare. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 2018.

\_\_\_\_\_. **The International Disaster Database**. [Online]. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. Disponível em: <<http://www.emdat.be/>>. Acesso em: 03/02/2021.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DO RIO GRANDE DO NORTE (EMPARN). Gerência de Meteorologia. **Climatologia Rio Grande do Norte**. Disponível em: [http://189.124.201.150/climaRN/medias\\_historicas\\_municipios\\_RN.htm](http://189.124.201.150/climaRN/medias_historicas_municipios_RN.htm). Acesso em: 10/12/2020.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Áreas Urbanas no Brasil em 2015**. Acesso em: 25/03/2021.

FENG, Q; LIU, J; GONG, J. Urban flood mapping based on unmanned aerial vehicle remote sensing and random forest classifier— A case of Yuyao, China. *Water*, v. 7, n. 4, p. 1437-1455, 2015. DOI: 10.3390/w7041437.

FREITAS, C. M.; XIMENES, E. F. Enchentes e saúde pública: uma questão na literatura científica recente das causas, consequências e respostas para prevenção e mitigação. *Ciênc. saúde coletiva*, Rio de Janeiro, v. 17, n. 6, p. 1601-1616, 2012.

FUNDAÇÃO BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (FBDS). **Mudanças Climáticas e Eventos Extremos no Brasil**, 2016. Disponível em: <[http://www.fbds.org.br/cop15/FBDS\\_MudancasClimaticas.pdf](http://www.fbds.org.br/cop15/FBDS_MudancasClimaticas.pdf)>. Acesso em: 03/03/2021.

GOMES, H. B.; AMBRIZZI, T.; HERDIES, D. L.; HODGES, K.; SILVA, B. F. P. Easterly Wave Disturbances over Northeast Brazil: An Observational Analysis. *Advances in Meteorology*, 2015. DOI 10.1155/2015/176238.

GRAHAM, D. H.; HOLANDA FILHO, S. B. Interregional and urban migration and economic growth in Brazil. In: Migrações internas e desenvolvimento regional. CEDEPLAR/UFMG, Mimeo, 1973.

GOMEZ-IBAÑEZ, J. A.; NÚÑEZ, F. R. Inefficient Cities. Policy Briefs: HARVARD Kennedy School, 2009.

GRANDE, M.; GALVÃO, C.; MIRANDA, L.; RUFINO, I. (2014) Environmental equity as a criterion for water management. Proceedings of ICWRS2014, v. 364, p. 519-525.

GROSTEIN, M. D. Metrópole e Expansão Urbana: A Persistência de Processos "Insustentáveis". *São Paulo Perspec.*, São Paulo, v. 15, n. 1, p. 13-19, jan. 2001.

GURGEL, A. L.; MEDEIROS, J. F. Caracterização das condições climáticas de Pau dos Ferros - RN. *Revista Geotemas*, v. 8, n. 2, p. 100-115, 2018.

HEIDEMANN, H. K. Especificação base Lidar. *US Geological Survey Techniques and Methods*, v. 11, cap. B4, p. 101-1117, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3133/tm11b4>.

HIRT, C.; FILMER, M. S.; FEATHERSTONE, W. E. Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM, SRTM and GEODATA DEM-9S digital elevation models over Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 57, n. 3, p. 337-347, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **Censo Demográfico 1960, 1970, 1980, 1991, 2000 e 2010**, Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **Atlas de saneamento 2011**. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: Acesso em: 19/02/2020.

INSTITUTO DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO RIO GRANDE DO NORTE (IGARN). **Bacia Apodi/Mossoró**. Disponível em: < <http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/IGARN/doc/DOC00000000028892.PDF>>. Acesso em: 7 mar. 2021.

JORGE, L. A. DE C.; INAMASU, R. Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. **Ferramentas para agricultura de precisão**, p. 109–134, 2014.

JUSTO, J. F. A.; SANTOS, W. L. A.; SOUZA, F. C. S. A bacia do Rio Apodi-Mossoró (RN) como objeto de pesquisa em programas de pós-graduação. **Revista Principia**, v. 31, n. 5, p. 97-105, 2016.

LEE, S.; NAKAGAWA, H.; KAWAIKE, K.; ZHANG, H. Urban inundation simulation considering road network and building configurations. **Flood Risk Management**, v. 9, p. 224–233, 2016.

LEITÃO, J. P.; VITRY, M. M. DE; SCHEIDEGGER, A.; RIECKERMANN, J. Assessing the quality of digital elevation models obtained from mini unmanned aerial vehicles for overland flow modelling in urban areas. **Hidrology and Earth System Sciences**, v. 20, p. 1637–1653, 2016.

LIMA, C. C. **Identificação e avaliação de zonas de alagamentos urbanos na cidade de Natal, Nordeste do Brasil, com o suporte de geotecnologias**. 2019. 136f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

LIMA, C.; AMARO, V.; ARAÚJO, P.; SANTOS, A. Identificação e Avaliação de Zonas de Alagamentos Urbanos, com o Suporte de Geotecnologias, na Cidade de Natal, Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**. v. 42, n. 2, p. 378-394, 2019.

MANTOVANI, J. R.; BACANI, V. M. Uma proposta metodológica de mapeamento de áreas suscetíveis à inundação e/ou alagamento, na bacia hidrográfica do córrego Indaiá-MS. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, v. 22, n. 3, p. 687-706, 2018. DOI: 10.11606/issn.2179-0892.geousp.2018.146752.

MARENGO, J. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. **Parcerias Estratégicas**, v. 27, p. 149-75, 2008.

MARICATO, E. MetrÓpole, legislação e desigualdade. **Estudos Avançados**, v. 17, n. 48, p. 151-167, 2003.

MCCLURE, A. *et al.* Evaluation of Error Reduction Techniques on a LIDAR-Derived Salt Marsh Digital Elevation Model. **Journal of Coastal Research**. v. 32, n. 5, 2015.

MORAES, G. F.; SILVA, A. R. C. B. Metodologia de diagnóstico do sistema de drenagem pluvial aplicado a microbacia do córrego Quarta-Feira em Cuiabá-MT. **E&S Engineering And Science**, v. 8, n. 1, p. 79-94, 9 abr. 2019. <http://dx.doi.org/10.18607/es201988061>.

NEVES, M. G. F. P; TUCCI, C. E. M. Composição de resíduos de varrição e resíduos carreados pela rede de drenagem, em uma bacia hidrográfica urbana. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, p. 331-336, 2011.

OBERMAIER, M.; ROSA, L. P. Mudança climática e adaptação no Brasil: uma análise crítica. **Estud. av.**, São Paulo, v. 27, n. 78, p. 155-176, 2013.

OLIVEIRA, P. T.; LIMA, K. C.; SILVA, C. M. S. Synoptic environment associated with heavy rainfall events on the coastland of Northeast Brazil. **Advances in Geosciences**, v. 35, p. 73-78, 2013.

OLIVEIRA, D. R. DE; CICERELLI, R. E.; ALMEIDA, T. DE; MAROTTA, G. S. Geração de modelo digital do terreno a partir de imagens obtidas por Veículo Aéreo Não Tripulado. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 6, p. 1143-1151, 2017.

OTHOW, O. O.; GEBRE, S. L.; GEMEDA, D. O. Analyzing the Rate of Land Use and Land Cover Change and Determining the Causes of Forest Cover Change in Gog District, Gambella Regional State, Ethiopia. **Journal Of Remote Sensing & Gis**, v. 6, n. 4, p. 1-13, 2017. <http://dx.doi.org/10.4172/2469-4134.1000219>.

PEDREIRA, W. J. P.; OLIVEIRA, J. A.; SANTOS, P. S. Avaliação da acurácia altimétrica usando a tecnologia VANT. **Revista Caminhos de Geografia Uberlândia**, v. 21, p. 209-222, 2020.

PEDROSA, A. S. A geomorfologia perante a ciência geográfica: algumas reflexões. **Soc. nat.**, v. 26, n. 3, pág. 409-417, 2014.

PEREIRA, R. S.; NUNES, A. B. Estudo climático dos eventos de precipitação associados a alagamentos urbanos no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 6, p. 2010-2017, 2019.

PINA, M. F. **Modelagem e Estruturação de Dados Não-Gráficos em Ambiente de Sistemas de Informação Geográfica: estudo de caso na área de saúde pública**. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia. 1994.

POTT, C. M.; ESTRELA, C. C. Histórico ambiental: desastres ambientais e o despertar de um novo pensamento. **Estudos Avançados**, v. 31, n. 89, p.271-283, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142017.31890021>.

RUFINO, I.; COSTA, D. S. B.; ALVES, P. B. R. Multi-Temporal Built-Up Grids of Brazilian Cities: How Trends and Dynamic Modelling Could Help on Resilience Challenges?. **Sustainability**. v.13, n. 2, p. 748-756, 2021.

SANTOS, K. A.; RUFINO, L. A. A.; BARROS FILHO, M. N. M. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande - PB. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 22, n. 5, p. 943-952, 2017.

SANTOS, W. O. *et al.* Chuvas intensas para a Microrregião de Pau dos Ferros - RN. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 6, p. 1093-1099, 2015.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS (SEMARH). **Bacia Apodi/Mossoró**. Disponível em: <<http://servicos.semarh.rn.gov.br/semarh/sistemadeinformacoes/consulta/cBaciaDetalhe.asp?CodigoEstadual=01>>. Acesso em: 11/02/2021.

SILVA, F. H. *et al.* Evaluation of the accuracy of volume calculation obtained by UAV. **REVISTA AGRO@MBIENTE ON-LINE**, v. 14, 2020.

SILVA, M. M. N. *et al.* A manutenção das APP's urbanas e o ordenamento territorial: apontamentos sobre Pau dos Ferros/RN. **Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos**, v. 5, n. 2, p. 284-296, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.18224/baru.v5i2.7501>.

SILVA, T. C. *et al.* Diagnóstico e hierarquização de problemas de drenagem urbana da zona costeira sul do estado da Paraíba. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 144-152, 2008.

SOUTO, L. V.; SOUSA JÚNIOR, A. M.; LIMA JÚNIOR, F. O. Economia e aspectos da urbanização na Microrregião de Pau dos Ferros, Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos**, v. 5, n. 2, p. 182-198, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.18224/baru.v5i2.7564>.

STAMM, Cristiano *et al.* A população urbana e a difusão das cidades de porte médio no Brasil. **Interações (Campo Grande)**, Campo Grande, v. 14, n. 2, p. 251-265, Dec. 2013.

TORNQUIST, C. G.; SILVA, D. S. Current And Future Land Use And Land Cover Scenarios In The Arroio Marrecas Watershed. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.**, v. 23, n. 3, p. 215-222, 2019.

TRICART, J. **Principes te méthodes de la Géomorphologie**. Paris: Masson, 1965.

TUCCI, C. E. M. **Inundações e Drenagem Urbana**. Em: Tucci, Carlos E. M., Bertoni, Carlos (Org.). Inundações urbanas na América do Sul (p.45-150). Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

\_\_\_\_\_. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre. Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998, 668p.

TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L.; BARROS, M.T. (org.). **Drenagem urbana**. Porto Alegre, ABRH, 1995.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F.; ALBUQUERQUE, P. C. G. Topodata: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal, RN. **Anais**, São José dos Campos, SP : INPE, 2009. v. CD-ROM. p. 1-8.

*Área da unidade territorial*: Área territorial brasileira. Rio de Janeiro: IBGE, 2021