

Dissertação de Mestrado

**O USO DE VANTS NA GERAÇÃO DAS MANCHAS DE INUNDAÇÃO NO
MUNICÍPIO DE PONTE NOVA (MG)**

Giana Grupioni Rezende

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Florêncio de Souza

Data de entrega do plano à comissão coordenadora: 28/03/2022

Data da defesa da dissertação: 08/04/2022

Banca examinadora:

Dr. Felipe Geremia Nievinski

Dr. Mario Luiz Reiss

Dr. Reginaldo Macedonio da Silva

Porto Alegre

2022

GIANA GRUPIONI REZENDE

**O USO DE VANTS NA GERAÇÃO DAS MANCHAS DE INUNDAÇÃO NO
MUNICÍPIO DE PONTE NOVA (MG)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Florêncio de Souza

Porto Alegre
2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus que me deu oportunidades, força de vontade e coragem para superar todos os desafios.

À minha família, principalmente ao meu marido Raphael, por todo apoio, paciência e compreensão.

Ao meu orientador Dr. Sérgio Florêncio de Souza, que me ajudou com as suas precisas e incisivas pontuações e a todos os professores pelos ensinamentos e que sempre estiveram dispostos a ajudar e contribuir para um melhor aprendizado.

À equipe multiprofissional da CPRM – Serviço Geológico do Brasil, pela oportunidade de realizar esta dissertação com materiais fornecidos, além de dar aporte financeiro.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que fizeram parte dessa etapa decisiva em minha vida.

RESUMO

O presente estudo contempla em seu escopo a simulação das manchas de inundações para épocas de cheias com base em dados de elevação do terreno obtidos pelo aerolevanteamento com veículo aéreo não tripulado (VANT). O município de Ponte Nova, localizado na Zona da Mata mineira, é cortado pelo rio Piranga que é o principal formador da bacia do rio Doce. Para o mapeamento das áreas de inundação foram utilizados os seguintes equipamentos de aerolevanteamento e Geodesia: VANT de modelo Phantom 4 Pro da DJI, e receptores GNSS. Em campo, foram rastreados 38 pontos de coordenadas (alvos artificiais ou alvos naturais) para utilização como pontos de controle e de checagem para georreferenciamento das imagens. Um fator importante considerado foi o nível de detalhamento do terreno necessário, para isso padronizou-se a altura de voo de 120 metros em relação ao terreno a partir do ponto mais alto, no qual foi iniciado o voo. No aerolevanteamento, foram adquiridas 3663 imagens e o processamento delas geraram-se produtos como ortofotomosaico e modelos digitais do terreno/superfície. Estes produtos auxiliaram no processo de geração dos limites de mancha de inundação para os eventos dos anos de 2008 e 2012. Com esta dissertação, pode-se destacar que a utilização do VANT para geração de um modelo do terreno permite a obtenção de mapas detalhados de inundação, podendo ser um instrumento decisivo na prevenção, controle e gestão dos riscos.

Palavras-chave: Aerolevanteamento. Modelo Digital de Terreno (MDT). Inundação.

ABSTRACT

The present study contemplates in its scope the simulation of flood spots for flight times based on data of elevation of the terrain reached by the aerial survey with unmanned aerial vehicle (UAV). The municipality of Ponte Nova, located in the Zona da Mata Mineira, is crossed by the Piranga River, which is the main formator of the Doce River basin. To map the flood areas, the following aerial surveying and geodesy equipment was used: DJI's Phantom 4 Pro model UAV and GNSS receivers. In the field, 38 coordinate points (artificial targets or natural targets) were tracked for use as control points and verification of image georeferencing. An important factor considered was the level of detail of the terrain required, for which it was standardized at a flight height of 120 meters in relation to the terrain from the highest point, none of which was started or flight. In the aerial survey, 3663 images were acquired and their processing generated products such as orthophotomosaic and digital models of the terrain / surface. These products assist in the process of generating flood spot limits for events in the years 2008 and 2012. With this article, it can be shown that using UAV to generate a terrain model allows the display of detailed flood maps, can be a decisive instrument in the prevention, control and management of risks.

Keywords: Air Lift. Digital Terrain Model (DTM). Flood Spot.

Lista de Figuras

Figura 1 - Representação esquemática de inundação e enchente	11
Figura 2 - Influência da urbanização em diferentes etapas do ciclo da água	12
Figura 3 - VANT multirrotores com quatro hélices	17
Figura 4 - VANT asa fixa	17
Figura 5 - Representação Recobrimento Aéreo	19
Figura 6 - Exemplo de sobreposição lateral e longitudinal	20
Figura 7 – Variação do Recobrimento Lateral	21
Figura 8 – Deslocamento devido à paralaxe.....	22
Figura 9 – Condição mínima de apoio para um modelo fotogramétrico.....	23
Figura 10 - Representação da posição do filme na tomada da fotografia.....	25
Figura 11 - Conceito de orientação interior	25
Figura 12 - Localização de um ponto homólogo	26
Figura 13 - Ângulos de altitude da aeronave	27
Figura 14 – Malha Regular Retangular	29
Figura 15 – Malha Triangula -TIN	30
Figura 16 – Imagem da inundação do ano de 2008.....	31
Figura 17 – Modelo Digital de Elevação de Ponte Nova (MG)	31
Figura 18 – Visualização dos sinalizadores artificiais (a) e naturais (b).....	33
Figura 19 –Aerolevanteamento e pontos de apoio	35
Figura 20 – Aquisição das imagens	36
Figura 21 – Fluxograma do processamento das ortofotos e do MDT.	37
Figura 22 – Chuva Total do Trimestre	40
Figura 23 - Processamento PPP - IBGE da Base.....	41
Figura 24 – Perfis Transversais e Pontos de Inundação	43
Figura 25 – Perfis Transversais	44
Figura 26 – Produtos do Aerolevanteamento	46
Figura 27 – Mancha de Inundação 2008 (a) e 2012(b)	47

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Cálculo do volume de chuva no período de enchente 2008 e 2012.....	41
Tabela 2 – Pontos de apoio.....	42
Tabela 3 – Área dos perfis transversais	45
Tabela 4 – Área das seções transversais e cotas de inundações estimadas	45
Tabela 5 – Tabela comparativa dos dados obtidos e o esperado	49

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANA	Agência Nacional de Águas
CCD	Charge – Coupled Device
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GNSS	Global Navigation Satellite System
GSD	Ground Sample Distance
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	Inverse Distance Weighting
LIDAR	Light Detection and Ranging
MDT	Modelo Digital de Terreno
PPP	Posicionamento Por Ponto Preciso
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TIN	Triangulated Irregular Network
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VTOL	Vertical Take-Off and Landing

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	9
2.	OBJETIVO GERAL.....	10
2.1	Objetivos Específicos	10
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
3.1	Hidrologia	11
3.2	Fenômeno das Inundações.....	11
3.3	Bacia Hidrográfica.....	14
3.4	Fotogrametria	14
3.4.1	<i>Breve História da Fotogrametria</i>	14
3.4.2	<i>Fotogrametria Digital</i>	15
3.5	Aerofotogrametria	15
3.5.1	<i>Etapas no projeto fotogramétrico</i>	18
3.5.1.1	<i>Definição do Projeto</i>	18
3.5.1.2	<i>Planejamento do Voo</i>	19
3.5.1.3	<i>Sobreposição Lateral e Longitudinal</i>	20
3.5.1.4	<i>Paralaxe Estereoscópica Aproximada</i>	21
3.6	Planejamento do apoio de campo	22
3.7	Execução do aerolevanteamento	24
3.8	Processo de Aerotriangulação	24
3.9	Orientação Interior	24
3.10	Correlação de Imagens.....	26
3.11	Orientação Exterior	26
3.12	Geoprocessamento aplicado	27
3.12.1	Sistema de Informações Geográficas (SIG).....	27
3.12.2	Modelo Digital de Terreno	28
4.	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	30
4.1	Área de estudo e problematização	30
4.2	Levantamento Geodésico: apoio de campo	32
4.3	Aerolevanteamento: planejamento e processamento	34
4.4	Análise da Precipitação.....	38
4.5	Mancha de Inundação	39
4.6	Validação da mancha de inundação	39
5.	RESULTADOS.....	40
5.1	Análise da Precipitação.....	40
5.2	Levantamento Geodésico: apoio de campo	41
5.3	Mancha de Inundação	43
5.4	Validação da Mancha.....	49
6.	CONCLUSÃO.....	50
	Referências	51

1. INTRODUÇÃO

Desde o início da civilização humana, devido à facilidade de transporte ao longo do rio, as cidades começaram a se desenvolver em suas margens. A relação entre o homem e os sistemas fluviais é caracterizada por aspectos positivos e negativos. Dentre os aspectos positivos, destaca-se o desenvolvimento agrícola, pois nas planícies de inundação encontram-se as terras férteis, e em contrapartida estas áreas são mais suscetíveis às cheias naturais e as inundações (FERNANDEZ, 2015).

Em casos com intensa precipitação, é comum que ocorra aumento da vazão dos rios, por vezes atingindo a planície de inundação. Em bacias urbanas essa situação é agravada, devido à impermeabilização do solo. Em algumas situações, estes eventos de inundação causam danos estruturais na cidade e grandes prejuízos aos seus habitantes (SARTORI, 2018).

De acordo com Buffon (2018), as características climáticas regionais e as alterações na bacia hidrográfica, como o uso e ocupação do solo, tendem a interferir e agravar cada vez mais as cheias. Frente a essa problemática, são necessários trabalhos de prevenção, monitoramento, alerta e mapeamento destas áreas de risco à inundação. Além disso, os avanços tecnológicos dos equipamentos resultam em maior precisão e nível de detalhamento (BUFFON, 2018).

Dentre as plataformas para a aquisição de dados, destaca-se o Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT), e o seu uso no âmbito científico e civil cresce em ritmo acelerado, ganhando cada vez mais mercado e despertando a curiosidade das pessoas. Os VANTs estão sendo utilizados nas mais diversas aplicações, possibilitando alcançar localidades de difícil acesso, apresentando uma nova perspectiva visual comparada à observação usual em campo. Ainda, o baixo custo para obtenção de imagens, maior flexibilidade da resolução temporal e espacial, tem contribuído para o avanço dessa tecnologia (LONGHITANO, 2010).

Recentemente, muitos pesquisadores têm realizado estudos que visam à utilização de Veículos Aéreos não Tripulados (VANT) para aplicações em desastres. Alguns autores como: Murphy et al. (2008), Rathinam et al. (2008), Campoy et al. (2009), que abordam a importância do mapeamento com VANT (Veículos Aéreos não Tripulados) na redução do risco de desastres naturais ou provocados pelo homem, podendo ser utilizados nas

diversas fases do desastre, tanto antes de sua ocorrência (preparação, prevenção e mitigação) como durante (resposta) e após o evento (recuperação).

As ortofotos geradas a partir do processamento das imagens áreas do VANT possui um importante papel na análise da perspectiva de riscos. Além das ortofotos, outros produtos como o modelo digital de terreno (MDT), podem ser obtidos, auxiliando no processo e estudo de inundações em áreas urbanas (BUFFON, 2018).

Existe uma demanda por MDTs com alto nível de detalhamento e precisão para as mais diversas áreas de atuação, e este dado é imprescindível no monitoramento de fenômenos naturais. Em relação a outros métodos de aquisição como o LIDAR (*Light Detection And Ranging*) ou até mesmo levantamento topográfico/geodésico, que são técnicas que demandam alto custo, o VANT veio para suprir essa necessidade (PEREIRA et al., 2013; CIRILO et al., 2014; FENG et al., 2015; OLIVEIRA, 2017).

Diante disso, o objetivo do presente estudo é apresentar uma proposta metodológica para o processo de geração de mancha de inundação, usando como ferramenta de aquisição as imagens do VANT.

2. OBJETIVO GERAL

O objetivo do presente estudo é apresentar uma proposta metodológica para o processo de geração de mancha de inundação, usando como ferramenta de aquisição de imagens o VANT.

2.1 Objetivos Específicos

- Avaliar a precipitação no município de Ponte Nova (MG).
- Avaliar incertezas do aerolevanteamento.
- Gerar as manchas de inundações para os anos de 2008 e 2012.
- Analisar as manchas de inundações geradas por Modelo Digital de Terreno obtido pelo VANT.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Hidrologia

Hidrologia é a ciência que trata da água na Terra, sua ocorrência, circulação e distribuição, suas propriedades físicas e químicas, e sua reação com o meio ambiente, incluindo sua relação com as formas vivas (TUCCI, 2001 *apud* CHOW, 1959).

A Hidrologia tem tido uma evolução significativa, face aos problemas crescentes, resultados da ocupação das bacias hidrográficas, principalmente em áreas urbanas. E a ocupação da bacia pela população gera algumas preocupações, dentre elas pode-se destacar o impacto do meio sobre a população através das inundações.

3.2 Fenômeno das Inundações

É importante diferenciar os termos enchente e inundação (figura 1), pois são muito usados como sinônimos, mas de fato não são. Conforme Aimon (2017), a inundação é uma consequência das enchentes, onde é atingida a planície de inundação. Este autor ainda afirma que todas as enchentes podem provocar inundações, mas nem todas as enchentes podem ser definidas como inundações.

Figura 1 - Representação esquemática de inundação e enchente



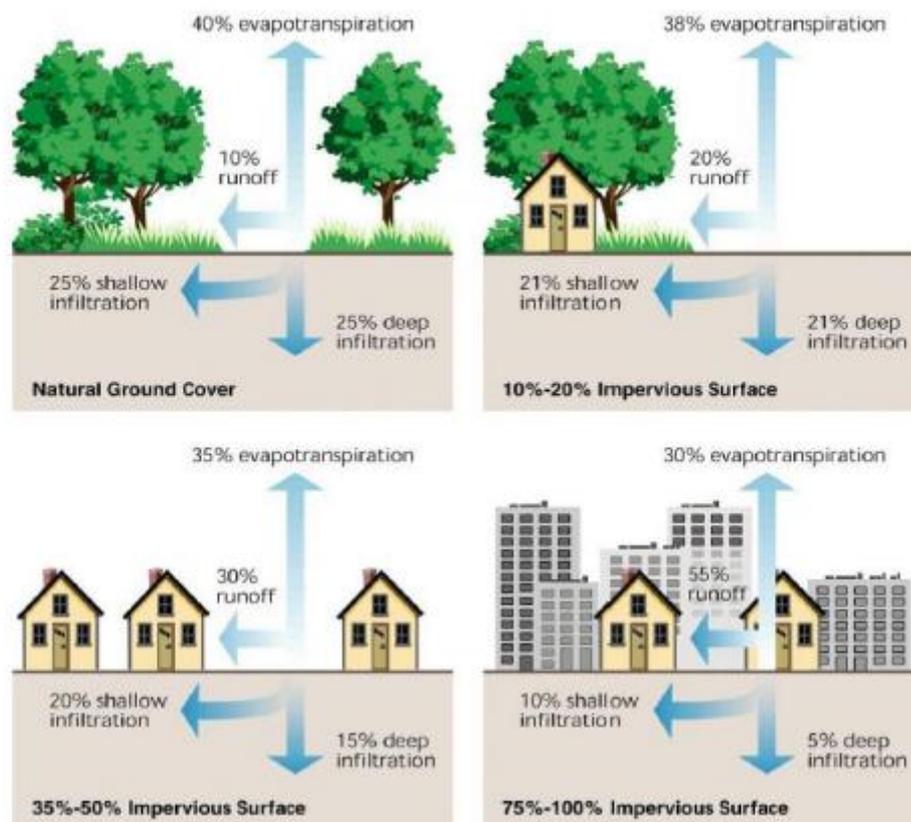
Fonte: Brasil, 2004

Desta maneira, a inundação seria o processo de extravasamento das águas do canal de drenagem para as planícies de inundação quando a enchente atinge uma cota acima do nível máximo da calha principal do rio (Carvalho et al., 2007).

Em áreas urbanas, existem amplas modificações antrópicas que influenciam no processo de formação de inundações. A construção de estradas, edifícios e casas frequentemente remove a cobertura vegetal e parte do solo e modifica a morfologia natural das cidades, resultando no aumento da proporção de superfícies impermeáveis. A redução da capacidade de absorção e infiltração de água no solo é acompanhada pelo aumento do escoamento superficial e de sua velocidade (Cajazeiro, 2012).

A crescente impermeabilização dos solos gera alterações no balanço entre infiltração e escoamento, aumentando assim o fluxo de água superficial que se direciona aos rios. Na figura 2, observa-se pode melhor demonstrar este fenômeno, em que as taxas de evapotranspiração, infiltração superficial e profunda diminuem com o aumento do processo de urbanização. Que em contrapartida, há um aumento significativo do escoamento superficial, o que gera maior propensão a inundações.

Figura 2 - Influência da urbanização em diferentes etapas do ciclo da água



Fonte: Cajazeiro, 2012

Os sistemas de drenagem pluvial das cidades são considerados por Ashley (2003) um dos principais pontos de estrangulamento no manejo de enchentes urbanas, uma vez que são subdimensionados e ainda sofrem com problemas de deterioração de sua capacidade devido ao acúmulo de lixo. O asfaltamento gera áreas preferenciais sem presença de obstáculos para o escoamento, resultando em um direcionamento de maior volume de água e com maior velocidade para os corpos hídricos. Outro problema refere-se ao despejo de esgotos e águas servidas, o que aumenta o volume basal dos cursos fluviais.

Além de todas essas questões, também existem as próprias alterações na calha fluvial, seja por assoreamento, gerado por direcionamento excessivo de material erodido de lotes vagos ou por disposição inadequada de lixo nesses locais, seja por obras de engenharia que canalizam e retificam os rios, transmitindo o problema das inundações para jusante. Pode - se ainda expor as alterações climáticas locais em áreas urbanas, que podem alterar os regimes pluviais.

Segundo Gladwell e Sim (1993), a magnitude de uma inundação e o risco para a população atingida são influenciados por fatores naturais e antrópicos. O aumento na vulnerabilidade das cidades às inundações deve-se principalmente, à artificialização contínua dos ecossistemas, à crescente migração urbana, à falta de planejamento na ocupação das cidades e as práticas de construções não sustentáveis.

Apesar de existirem técnicas para contenção de inundações ou para minimização de seus danos, é muito mais coerente adotar-se o princípio da precaução e da prevenção, evitando-se a ocupação desordenada e permitindo a continuidade do fenômeno das inundações sem riscos à vida e às atividades humanas. Deste modo, pode-se planejar uma convivência mais harmoniosa da sociedade com as inundações, visto que elas não são fenômenos regulares em sua frequência ou magnitude. Assim, para implantar soluções mais eficientes, é necessário um conhecimento cada vez mais aprofundado das características físicas das bacias hidrográficas e das alterações de seus comportamentos naturais pelas modificações do uso e ocupação do solo (CAJAZEIRO, 2012).

Nos estudos hidrológicos é importante também conhecer as características físicas da bacia hidrológica como: localização, área, forma, perímetro, relevo, rede de drenagem, solo, cobertura vegetal etc. Essa caracterização pode ser feita por fotogrametria, levantamento planialtimétrica ou ainda expedição a campo.

3.3 Bacia Hidrográfica

A bacia hidrográfica compõe-se basicamente de um conjunto de vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos d'água que confluem até resultar um leito único. É limitada pelo chamado divisor de águas, linha imaginária que acompanha as maiores altitudes locais, topo de morros, que separa uma bacia de outra (PRUSKI, 2012).

Na caracterização física da bacia hidrográfica estão incluídas as seguintes determinações: área, forma, perímetro, relevo (altitude e declividade), rede de drenagem, solo, cobertura vegetal etc. Essa caracterização pode ser feita por fotogrametria/fotointerpretação, levantamento planialtimétrico. (PRUSKI, 2012).

3.4 Fotogrametria

A palavra Fotogrametria é definida como a ciência aplicada, a técnica e arte de extrair medidas através de fotografias (luz).

3.4.1 Breve História da Fotogrametria

Os desenvolvimentos que conduziram ao presente estado da Fotogrametria, são anteriores ao invento da fotografia. Aristóteles, em 350 A.C. já mencionava como projetar imagens por meio ótico. Leonardo da Vinci em 1492 demonstrou graficamente os princípios da aerodinâmica e da projeção ótica; projetando mecanismos de polimentos de lentes (TOMMASELLI, 2012).

E com a invenção do avião, houve um grande avanço na fotogrametria, que até então era praticamente limitada à fotogrametria terrestre. Durante a Primeira Guerra, as aerofotos foram intensamente utilizadas principalmente para atividades de reconhecimento territorial. E no período entre as duas Guerras Mundiais, a Aerofotogrametria tornou-se uma tecnologia largamente utilizada para a produção de mapas.

Atualmente pode-se observar que praticamente a Fotogrametria analógica e analítica foi substituída pela Fotogrametria Digital. Existem estações de trabalho que fazem todo

o processo de restituição, com a vantagem de realizar o procedimento automaticamente, como a coleta dos modelos digitais do terreno (MDT) e a produção de ortoimagens. Ressalta-se ainda que, a automação completa no processo de restituição ainda deve aguardar avanços significativos da ciência fotogramétrica e da área da inteligência artificial.

3.4.2 *Fotogrametria Digital*

A fotogrametria digital surgiu em meados dos anos 80, tendo como grande inovação a utilização de imagens digitais como fonte primária de dados. A imagem digital pode ser adquirida diretamente de uma câmera digital, ou através da digitalização matricial de uma imagem analógica, submetendo-se a um scanner.

O objetivo da fotogrametria digital é a reconstrução automática do espaço tridimensional, a partir de imagens bidimensionais pelo processamento fotogramétrico em forma de pares estereoscópicos ou por interseção.

3.5 Aerofotogrametria

A ideia da construção de artefatos voadores não tripulados é antiga, inclusive mais antiga que a construção de aviões. Registros bibliográficos indicam quem, no ano de 1709, o Padre Bartolomeu Lourenço Gusmão projetou e construiu um balão de ar quente e demonstrou seu invento frente a corte portuguesa. Como os balões tinham facilidade em pegar fogo, os experimentos não foram bem-vistos na época. Somente em 1783 houve registro do primeiro voo de balão, quando os irmãos franceses Montgolfier (Joseph e Jacques) conseguiram percorrer uma distância de 3 quilômetros e alcançar uma altura de 300 metros. O primeiro registro de uma fotografia aérea, foi realizado em 1856 pelo fotógrafo francês Gaspard Felix Tournachon, quando ele fotografou a cidade de Paris a partir de um balão cativo tripulado. E em 1889, o fotógrafo Arthur Batut, fotografou a cidade de Labruguière (França) utilizando uma pipa.

A partir do século XX, houve um crescimento nos investimentos em pesquisas para o desenvolvimento de veículos aéreos não tripulados (VANT) cada vez mais modernos, principalmente para fins militares em países como Estados Unidos e Inglaterra. A década

de 70 começaram a surgir os VANTs de menor tamanho, o objetivo era de uso militar, com uma câmera de vídeos acoplada, acompanhar o território inimigo em tempo real. E a partir da década de 80 os VANTs começaram a ser amplamente utilizados em guerras, devido a diversas vantagens como a de não oferecer riscos a vida de tripulantes e pelo menor investimento em relação ao uso de uma aeronave tripulada.

No uso civil, a popularização dos VANTs somente se deu a partir do ano de 2010, com o desenvolvimento dos multirrotores. Esses VANTs se tornaram acessíveis aos consumidores e começaram a surgir inúmeros modelos de diversas marcas e com diferentes finalidades de uso.

O VANT também é conhecido por diversos nomes. No Brasil são também chamados popularmente de drones, que vem do inglês, traduzido como “abelha rainha” ou “zangão”. Na língua inglesa são conhecidos como *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV). Em comparação com aeronaves tripuladas e o sensoriamento remoto orbital (por satélite), apresentam três vantagens principais, a produção de fotografias aéreas com resoluções espaciais melhores com um menor custo, agilidade no levantamento dos dados e alta mobilidade (acessa locais em áreas de risco e de difícil acesso).

Atualmente, existem três tipos de VANTs, sendo eles multirrotores, asa fixa e híbridos:

- Os multirrotores (figura 3) que podem ter quatro hélices ou mais, tem a vantagem da decolagem e aterrissagem vertical e destaca-se por sua versatilidade e manobrabilidade, além de apresentar excelente relação custo-benefício. Uma grande vantagem dos multirrotores é a possibilidade de pairar num determinado local e obter fotografias sem estar em movimento. Em contrapartida, devido ao consumo de bateria pelo seu modo de voo e quantidade de rotores, esses tipos de VANTs apresentam limitações relacionadas à extensão da sua área de cobertura.

Figura 3 - VANT multirrotores com quatro hélices



Fonte: DJI

- Os VANTs de asa (figura 4) fixa também são bastante utilizados e muitas vezes assemelham-se aos aeromodelos tradicionais. Estes tipos de modelos são preferíveis em levantamento de grandes áreas e apresentam maior autonomia de voo, o que se deve à boa aerodinâmica e ao fato de possuir apenas um motor central. Como principal limitação dos VANTs de asa fixa, destacam-se o seu maior custo e maior complexidade da operação. Em alguns casos, há necessidade de pista de pouso/decolagem, o que pode ser um empecilho para o seu emprego. Além disto, imagens obtidas de modelos de asa fixa costumam não ter o mesmo padrão de qualidade dos multirrotores, pois sempre estão em movimento.

Figura 4 - VANT asa fixa



- Os híbridos, também chamados de VTOL (Vertical Take-Off and Landing) surgiram da combinação das vantagens dos multirrotores e asa fixa. Por ainda não terem sido popularizados no mercado, os modelos híbridos de VANT ainda apresentam valores de aquisição elevados em relação aos demais tipos de VANTs.

3.5.1 *Etapas no projeto fotogramétrico*

3.5.1.1 *Definição do Projeto*

Para definição do projeto de mapeamento, é fundamental a definição dos resultados esperados, isto é, determinar se o mapeamento tem como finalidade atender a um projeto de meio ambiente, cadastro urbano, cadastro rural, planejamento urbano, implantação de obra viária ente outros.

Após a definição da finalidade do projeto, tem-se as condições de estabelecer qual será o produto: escala, acurácia e o tipo de equipamento que melhor atende e resultados esperados.

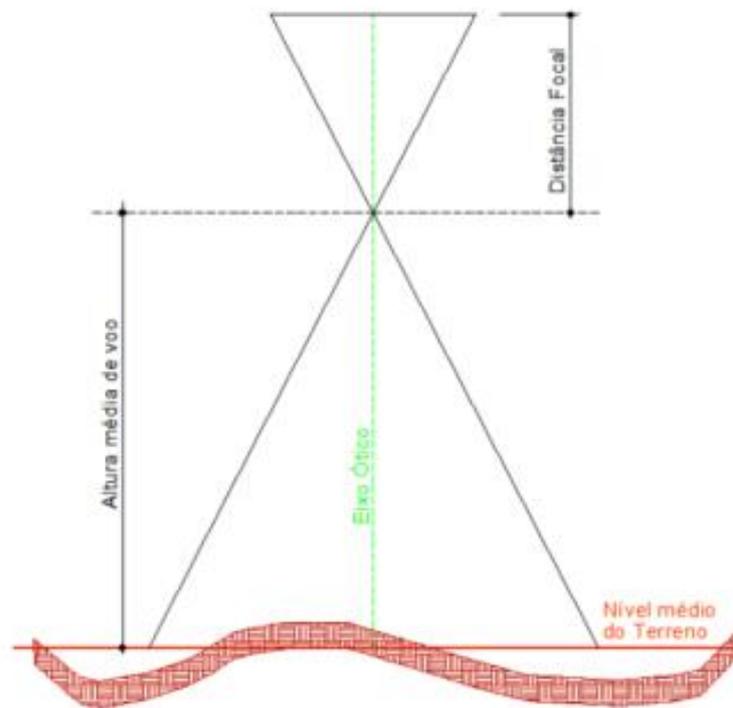
Ressalta-se que projeto com maior nível de detalhamento envolvem custos mais elevados. Quando se trata de escala, normalmente está vinculada à acurácia de posicionamento e detalhamento do produto. Ou seja, quanto menor a escala, menor é o detalhe e o custo/tempo de levantamento.

A escala de voo é um fator fundamental para um planejamento de voo quando da utilização de câmeras analógicas, que pode ser definida conforme a equação a seguir:

$$Escala\ de\ voo = \frac{Altura\ de\ voo}{Distância\ focal} \quad (1)$$

Já no caso das câmeras digitais, o fator determinante do produto gerado será o tamanho da menor porção que será capturada no solo, ou seja, sua resolução, ou ainda conforme termo em inglês GSD (*ground sample distance*), que corresponde à distância da amostra no solo, que equivale à resolução da imagem ou menor célula na imagem (pixel), representado na figura a seguir. (LIMA, 2016).

Figura 5 - Representação Recobrimento Aéreo



Fonte: Lima,2016

3.5.1.2 Planejamento do Voo

Nesta etapa, além de definir-se a escala de voo ou GSD utilizado, deve-se definir também a sobreposição lateral entre faixas, sobreposição longitudinal e velocidade de voo.

Segundo BRITO e COELHO (2002), a resolução espacial está diretamente relacionada com a capacidade de “enxergar” objetos tão pequenos quanto o filme ou CCD (*charged coupled device*), em casos de câmeras digitais.

Na imagem digital a resolução está relacionada diretamente com o tamanho do pixel (termo em inglês *picture element*). Desta maneira, quanto menor o pixel, maior será a capacidade de se distinguir objetos no solo.

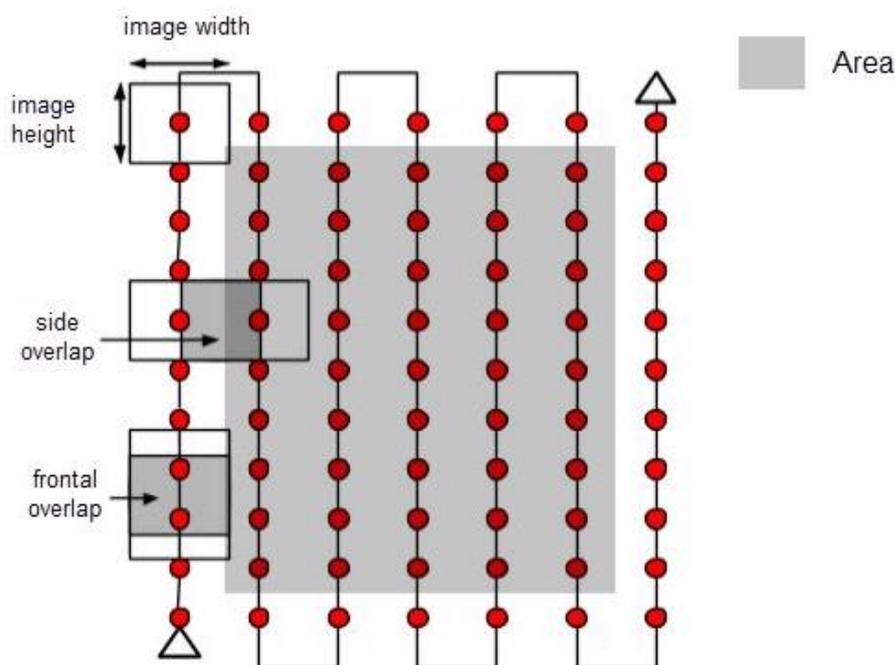
Ao tratar de câmeras digitais, a resolução das imagens ou GSD está relacionada ao tamanho do pixel, distância focal e altura de voo. Podemos calcular a altura de voo para atingirmos um determinado GSD da seguinte forma:

$$\frac{\text{Tamanho do Pixel}}{\text{Distância Focal}} = \frac{\text{GSD no terreno}}{\text{Altura de Voo}} \quad (2)$$

3.5.1.3 Sobreposição Lateral e Longitudinal

O *overlap* ou sobreposição (figura 6) está relacionado ao quanto uma imagem se sobrepõe a sua adjacente, frontalmente e/ou lateralmente. A sobreposição frontal (*frontal overlap*) é aquela que está relacionada a sobreposição entre as imagens sequências da mesma linha de voo ou longitudinal. Já a sobreposição lateral (*side overlap*) é aquela existente entre as linhas de voo.

Figura 6 - Exemplo de sobreposição lateral e longitudinal

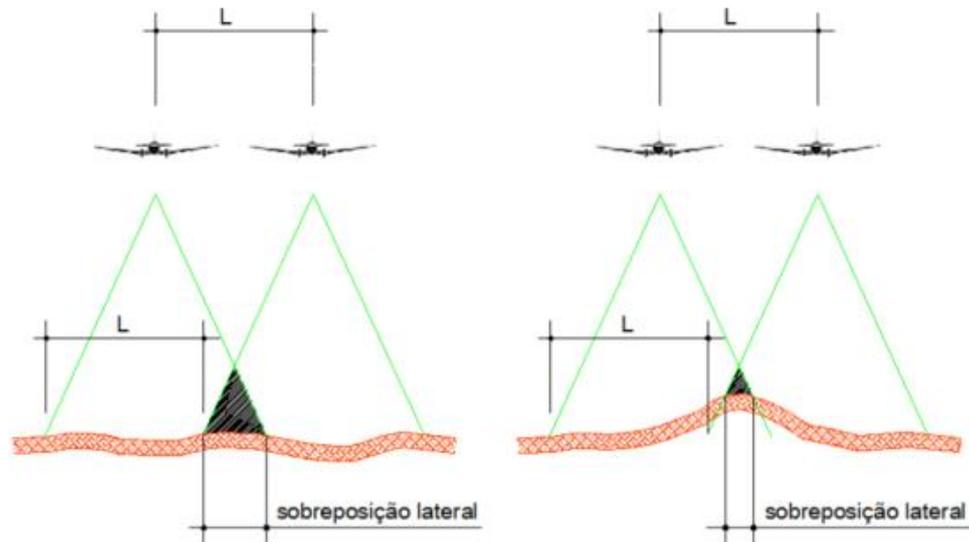


Fonte: Starek et al., 2019

A sobreposição é necessária para evitar a existência de “buracos” ocasionados por problemas durante a realização do voo, por exemplo, ventos fortes, variações na altura de voo devido a grandes variações altimétricas no terreno. De maneira geral os softwares de processamento recomendam uma sobreposição frontal 75% e lateral 60%. Estes percentuais devem ser aumentados em casos específicos.

A figura 7 demonstra a variação na sobreposição lateral, ocorrida devido as diferenças no relevo do terreno. Desta forma, uma análise cuidadosa na variação do terreno deve ser realizada durante o planejamento de voo.

Figura 7 – Variação do Recobrimento Lateral



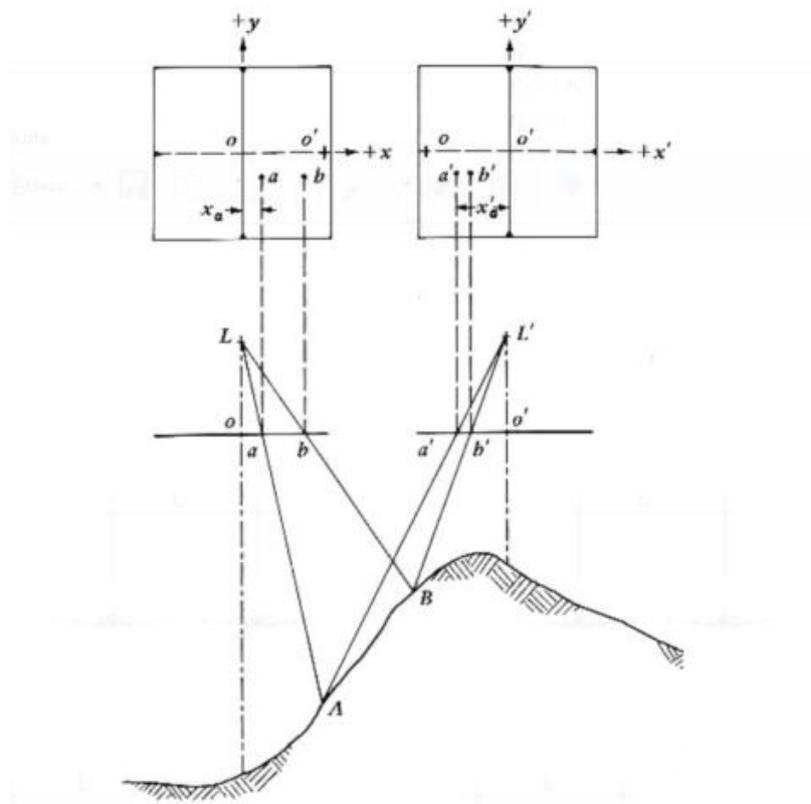
Fonte: Lima, 2016

3.5.1.4 *Paralaxe Estereocópica Aproximada*

Segundo Brito e Coelho (2002), o termo paralaxe refere-se à mudança aparente das posições relativas de imagens de objetos estacionários causada por uma mudança de ponto de vista.

Na figura 8, observa-se o ponto *a* e *b* nas duas imagens e sua conseqüente mudança de posição dos pontos observados em relação ao referencial. Como o ponto *b* está mais próximo à câmera, quanto maior a paralaxe, maior será a altitude do ponto. E estas propriedades das paralaxes irão permitir o cálculo de elevações e mesmo das coordenadas planialtimétricas.

Figura 8 – Deslocamento devido à paralaxe



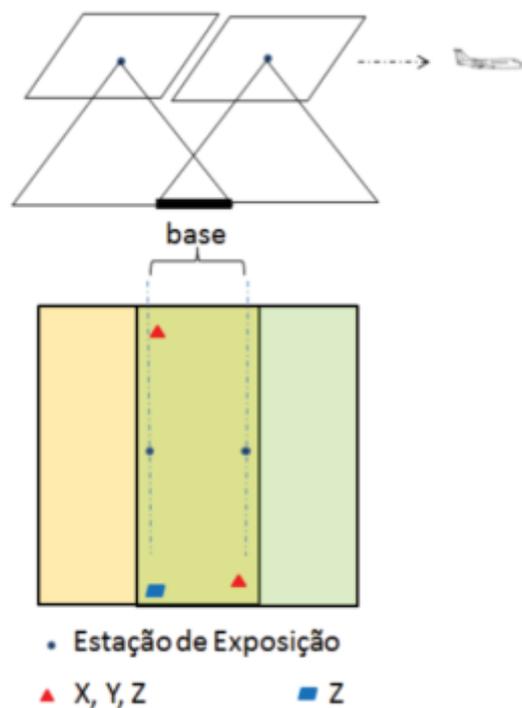
Fonte: Brito e Coelho, 2002

3.6 Planejamento do apoio de campo

Quando não se possui instrumental embarcado que não é capaz de fornecer um posicionamento que permita o georreferenciamento direto das imagens, o uso de pontos de apoio se faz necessário.

Esses pontos de apoio devem ser visíveis a partir de um mínimo de duas fotografias sobrepostas. Para atender a condição mínima de definição do referencial cartográfico, pelo menos três pontos de apoio são necessários. A figura 9 ilustra um exemplo da condição mínima de pontos de controle para um modelo estereoscópico.

Figura 9 – Condição mínima de apoio para um modelo fotogramétrico



Fonte: Graça, 2019

Como mencionado anteriormente, a situação descrita oferece uma condição mínima de apoio e caso haja alguma inconsistência nas coordenadas, o referencial materializado estará incorreto (GRAÇA, 2019). A recomendação é que haja pontos de apoio nas bordas do bloco e internamente distribuídos e que esses pontos sejam facilmente foto identificáveis.

Em muitos casos, principalmente em áreas de vegetação, existe a dificuldade na obtenção de feições no terreno, sendo necessário o desenho de um alvo. Estes alvos artificialmente para o apoio fotogramétrico devem apresentar geometrias “pontuais”, como por exemplo em “X”, “T” ou “Y”. E suas dimensões devem ser compatíveis com a escala das imagens, de modo a permitir a correta identificação e medição.

Mesmo com as tecnologias e facilidades, os pontos de apoio são frequentemente empregados na Fotogrametria e uma das etapas mais onerosas de um projeto cartográfico. Uma boa distribuição destes pontos não só é necessária para resolver a orientação absoluta do bloco de imagens no referencial cartográfico, mas também serve para mitigar as deformações do bloco.

3.7 Execução do aerolevamento

Após o planejamento e definição dos produtos a serem obtidos, passa-se para a etapa de execução do voo propriamente dito. A execução correta do voo irá garantir a possibilidade de geração dos produtos cartográficos dentro das especificações do projeto.

A realização do voo é feita de maneira automatizada (não autônoma) com auxílios de aplicativos de mapeamento (DJI GS PRO, MAP PILOT, PIX4D CAPTURE e etc.). A área a ser mapeada será definida na interface do aplicativo e os parâmetros de voo definidos de acordo com as características do levantamento.

Portanto, se o terreno possui grandes variações ou feições muito altas (árvores, edificações, fios elétricos), estes fatores devem ser levados em consideração.

3.8 Processo de Aerotriangulação

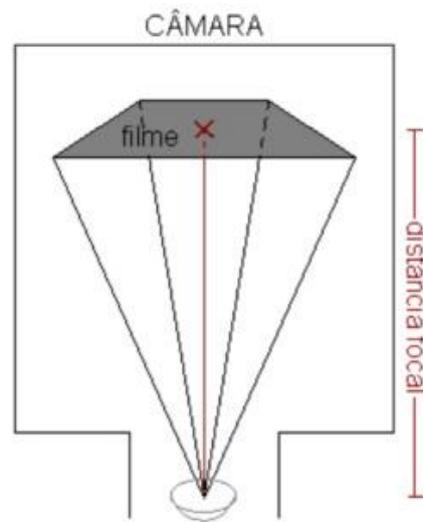
É o método utilizado para a determinação de pontos fotogramétricos, é uma etapa muito importante para a produção de soluções. Essa é uma técnica fotogramétrica que serve para determinar as coordenadas (X, Y e Z) de pontos específicos, traçando assim corretamente os seus dados como latitude, longitude e altitude.

Mesmo com a chegada das fotos digitais, a aerotriangulação fica ainda mais precisa quando tem apoio de dados fotogramétricos a partir do solo, ou seja, pelo apoio de campo, validando as informações das imagens aéreas e diminuindo sensivelmente a margem de erro dos dados finais.

3.9 Orientação Interior

Conforme Brito e Coelho (2002), entende-se por orientação interior o referenciamento da imagem em relação a câmera. Uma vez que as imagens obtidas encontram-se isoladas uma das outras e meramente salvas como arquivos digitais e sem nenhuma informação métrica, isto é, utilizando apenas o sistema de coordenadas em pixels. Assim faz-se necessário a reconstituição do sistema interno câmara-imagem correspondente ao momento em que as fotografias foram obtidas, como demonstrado na figura a seguir.

Figura 10 - Representação da posição do filme na tomada da fotografia

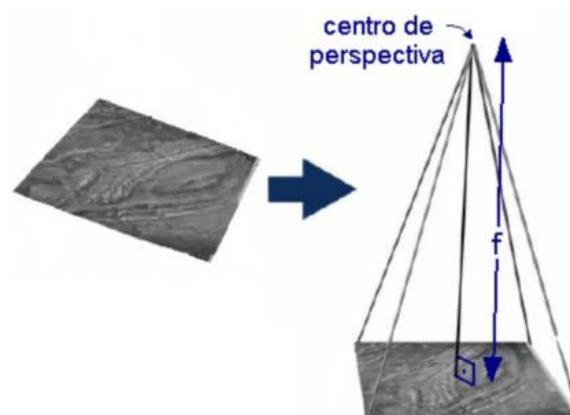


Fonte: Brito e Coelho, 2002

O sistema câmara-fotografia é composto de uma perpendicular ao centro da fotografia, e mede um comprimento igual à distância focal calibrada.

Conceitualmente, a orientação interior (figura 11) consiste apenas em colocar as imagens por imagem em posição semelhante à que exerciam dentro da câmara, no momento em que foram obtidas (Brito e Coelho, 2002).

Figura 11 - Conceito de orientação interior



Fonte: Brito e Coelho, 2002

3.10 Correlação de Imagens

Segundo Brito e Coelho (2002), no âmbito da fotogrametria digital, faz-se necessária a localização do ponto em uma (ou mais) imagens, que é homólogo a determinado ponto de outra imagem que tenha uma área de superposição com a imagem de referência. Desse modo, o mesmo objeto (ou feição) deverá estar presente em duas ou mais imagens ao mesmo tempo.

Mecanismos estereoscópicos e acurada visualização por parte do operador permitem localizar tais pontos manualmente, porém, muito mais interessante, é a ideia de se haver uma localização automática dos mesmos.

Figura 12 - Localização de um ponto homólogo

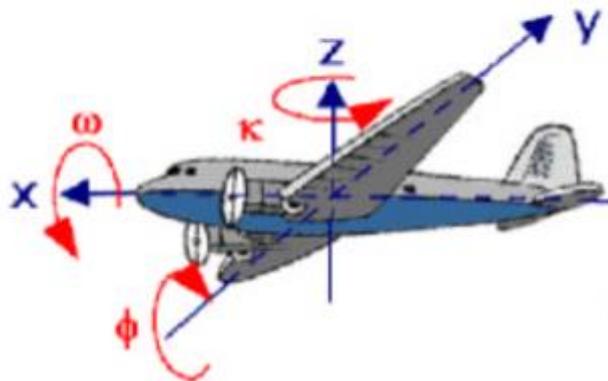


Fonte: Autor (2018)

3.11 Orientação Exterior

Orientação exterior é o processo pelo qual se encontra a orientação das imagens em relação ao sistema de coordenadas do terreno. A orientação exterior fornece, para cada imagem, os seis parâmetros de orientação exterior: as coordenadas nos eixos X, Y e Z do centro de perspectiva do sensor e seus ângulos de atitude ou de Euler (ω , φ e K) (Figura 13) no instante da tomada da fotografia. Esses parâmetros são referidos ao sistema de coordenadas do terreno.

Figura 13 - Ângulos de altitude da aeronave



Fonte: Brito e Coelho, 2002

Na figura 5 se pode identificar os parâmetros pitch (arfagem) ou phi (ϕ) que é a rotação em torno do eixo horizontal das asas; o roll (rolagem) ou ômega (ω) que é o movimento de asa devido à rotação da aeronave em torno do eixo longitudinal e yaw (guinada) ou kappa (κ) que é desvio da linha de vôo causada por uma rotação da aeronave em torno do seu eixo vertical, podendo se originar devido ao vento lateral. Outros termos ainda podem ser utilizados no movimento da aeronave. Se a aeronave não rotacionar em torno do eixo, mas, não seguir a linha de vôo chamasse de drift (deriva); a inclinação chamada (tilt) resultante de pitch e roll e a falha na orientação da câmara no sentido longitudinal o ângulo Crab (Ângulo de correção da deriva) (TOMMASELLI, 2012).

Conforme Brito e Coelho (2002), para encontrar soluções, utiliza-se métodos por ajustamento por equações de colinearidades.

3.12 Geoprocessamento aplicado

3.12.1 Sistema de Informações Geográficas (SIG)

Os SIG's são ferramentas computacionais que permitem realizar análises complexas ao integrar dados georreferenciados (CÂMARA et al., 2005).

Com base no tratamento e na análise de um banco de dados geográficos, são produzidas informações geográficas. Em ambiente SIG, os dados são estruturados em planos de informação, que são referenciadas a um sistema de coordenadas terrestres. Para

que ocorra a correta sobreposição entre os planos de informações, é necessário que possuam projeção cartográfica, sistema de coordenadas e que tenha sido gerada em escalas próximas.

3.12.2 Modelo Digital de Terreno

A utilização de geotecnologias, de Modelo Digital de Terreno obtido por VANT, juntamente com os modelos matemático, permitem conhecer melhor a dinâmica hidrológica e hidráulica da bacia hidrográfica. A tomada de decisão baseada nos resultados destes modelos fornece aos especialistas e gestores as informações espaciais importantes para análise e uma ação efetiva, possibilitando minimizar os impactos decorrentes das tragédias provocadas pelas enchentes e inundações (NASCIMENTO, 2016).

Os principais atributos do relevo são a altitude, declividade, comprimento, forma e orientação de topos, encostas e vales. Esses atributos influenciam como se dará o escoamento superficial. Existem variadas técnicas de representação de relevo sendo as mais usuais: pontos e curvas de nível. Por definição, duas curvas de nível não se cruzam (PINTO, F. A. C, 1994).

Segundo Chaves (2002), no processo de modelagem pode-se distinguir em três fases:

a) Aquisição dos dados: conjuntos de amostras representativos da variação da altitude no espaço.

b) Escolha do modelo matemático (modelagem): deve apresentar a superfície com elevado grau de exatidão. Existe o modelo de interpolação de distribuição regular, que consiste numa matriz células quadradas em que cada um de seus elementos apresenta o seu valor médio de altitude armazenado. O modelo de rede triangular irregular (TIN – Triangular Irregular Network) é um modelo que aproxima a superfície através de poliedros de faces triangulares, onde os pontos das coordenadas tridimensionais são ligados por linhas, formando triângulos.

c) Elaboração dos produtos finais.

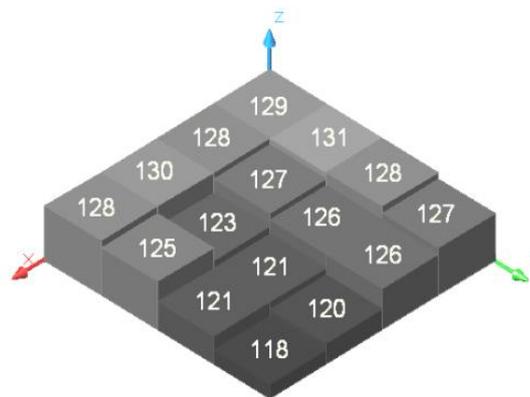
Nos processos hidrológicos, é necessária a identificação do caminho do escoamento superficial entre cada célula. Se, caso não haja a rede de drenagem bem definida, o uso de um algoritmo pode ser mais apropriado.

Para a resolução desse problema, o método mais utilizado na definição de rede de drenagem, é a partir da simulação do caminho de escoamento superficial. Nessa abordagem envolve quatro etapas:

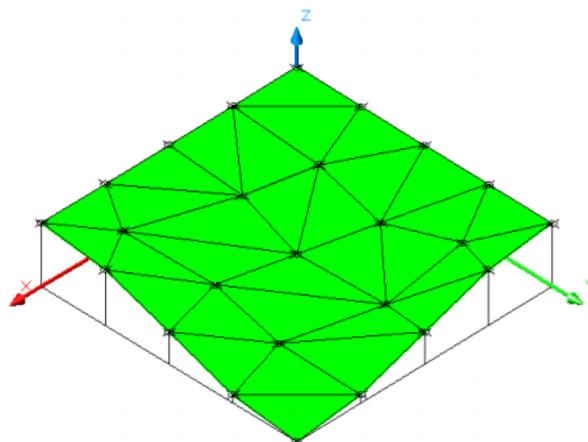
- a) geração do modelo digital de elevação
- b) preenchimento das depressões espúrias
- c) identificação do caminho do escoamento superficial entre cada célula do MDT e suas vizinhanças a partir do fluxo acumulado, que é uma medida do acúmulo de células em cada pixel.

As depressões espúrias são células cercadas por células com maiores valores de elevação, que produz uma descontinuidade do escoamento superficial para uma célula vizinha. E uma vez removido as depressões espúrias, pode-se então ser definido como a melhor representação digital do relevo no formato matricial (Figura 14) ou TIN (Figura 15).

Figura 14 – Malha Regular Retangular



Fonte: ESRI,2001

Figura 15 – Malha Triangula -TIN

Fonte: ESRI,2001

4. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O presente trabalho foi dividido em seis etapas: 1) Área de estudo e a problematização; 2) Levantamentos geodésicos; 3) Aquisição de dados espaciais com o VANT; 4) Estudo pluviométrico; 5) Geração da mancha de inundação; e 6) Validação da mancha de inundação.

4.1 Área de estudo e problematização

Ponte Nova, município da zona da mata mineira, destaca-se pelo histórico de enchentes desde a década de 1970, devido à elevação do nível da água do Rio Piranga, principal formador do Rio Doce. Para o presente estudo, destacam-se os eventos ocorridos em dezembro 2008 e janeiro 2012, período com grande índice pluviométrico e de grandes desastres ocasionados pelas de chuvas concentradas, principalmente nos meses de dezembro e janeiro. Os picos das inundações ocorreram em 17/12/2008 e 03/01/2012 e a na Figura 16 observa-se a região antes da elevação do rio e no pico da inundação 2008.

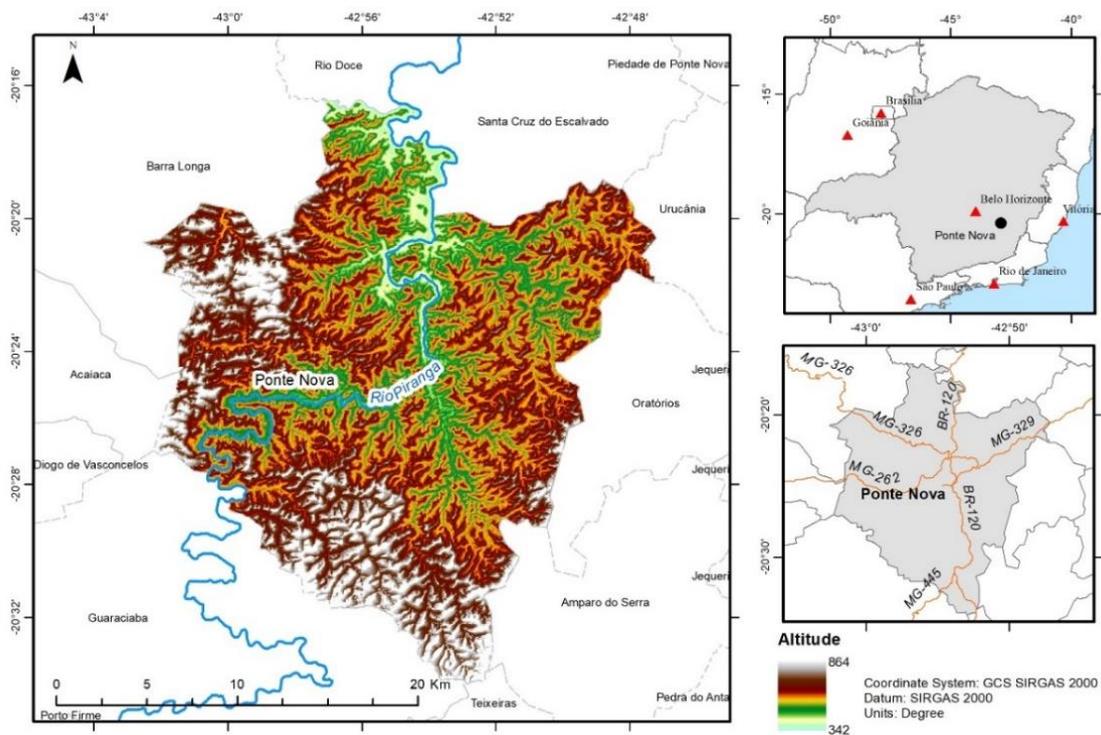
Figura 16 – Imagem da inundação do ano de 2008



Fonte: VANT (a) e Google (2008) (b).

Ressalta-se a localização do município, região de relevo acidentado, ou seja, com variação altimétrica em toda a extensão do município de 342 a 864 metros (Figura 17), sendo a altitude média na cidade de 431 metros. Esse tipo de relevo favorece aos rápidos picos de inundação, em função da alta velocidade de escoamento.

Figura 17 – Modelo Digital de Elevação de Ponte Nova (MG)



Fonte: IBGE (2017) e EMBRAPA (2013). Adaptado pelos autores (2019).

4.2 Levantamento Geodésico: apoio de campo

Conforme IBGE (2017), o posicionamento através da tecnologia GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), consiste na determinação de coordenadas tridimensionais (3D) a partir de constelações de sistemas globais de navegação por satélite. De conhecimento das coordenadas dos satélites, a partir das efemérides transmitidas, em um sistema de referência apropriado, no caso o SIRGAS 2000, é possível calcular as coordenadas da antena do receptor no mesmo sistema de referência dos satélites. Para determinar esta localização é necessário o ajustamento de quatro parâmetros, três relacionados à posição e um ao erro de não sincronismo entre os relógios dos satélites e do receptor. Por esse motivo são necessários quatro satélites, no mínimo, para a obtenção das medidas concomitantes pelos receptores, com coordenadas conhecidas (MONICO, 2008).

Mas todo levantamento GNSS está sujeito a degradações provocadas por diversas fontes, como por exemplo: receptor/antena, das observáveis, da propagação do sinal e até mesmo do próprio usuário. Se estas correções não forem consideradas no processamento, o erro poderá inviabilizar o posicionamento geodésico (IBGE, 2017).

Para o planejamento do apoio ao aerolevantamento, são utilizados dos pontos de apoio, que são pontos de coordenadas conhecidas, marcadas em campo e que servem como controle no ajustamento posicional e na sobreposição das imagens. Estes pontos fotoidentificáveis (Figura 18) podem ser artificiais (existe a necessidade de demarcar na área de estudo) ou ainda naturais (alvos já presentes no ambiente).

Figura 18 – Visualização dos sinalizadores artificiais (a) e naturais (b)



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Para obtenção das coordenadas destes pontos, usou-se o método de posicionamento relativo estático. Ou seja, são necessários no mínimo dois receptores (L1 ou L1/L2) em rastreamento simultâneo para realizar posicionamento. Ressalta-se que neste tipo de levantamento há necessidade de instalar um dos receptores em um ponto com coordenadas conhecidas e dependendo da situação requer um longo período de ocupação dos pontos.

O ponto de coordenada conhecida, denominada como Base, estava posicionada na região central do aerolevanteamento, e ficou em rastreamento contínuo durante dez dias e simultaneamente foram obtidas trinta e oito coordenadas de apoio.

A correção do posicionamento da base foi realizada pelo método de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), serviço online do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Utilizando-se este serviço, obtiveram-se as coordenadas planialtimétricas, ajustadas segundo modelos matemáticos, para correções de interferências naturais e melhoria dos parâmetros de posicionamento dos satélites nos momentos de aquisição.

E por fim, com as coordenadas planialtimétricas da base corrigida e adotando o sistema de referência geodésico SIRGAS, realizou-se o pós-processamento dos pontos de apoio, obtendo assim as coordenadas ajustadas.

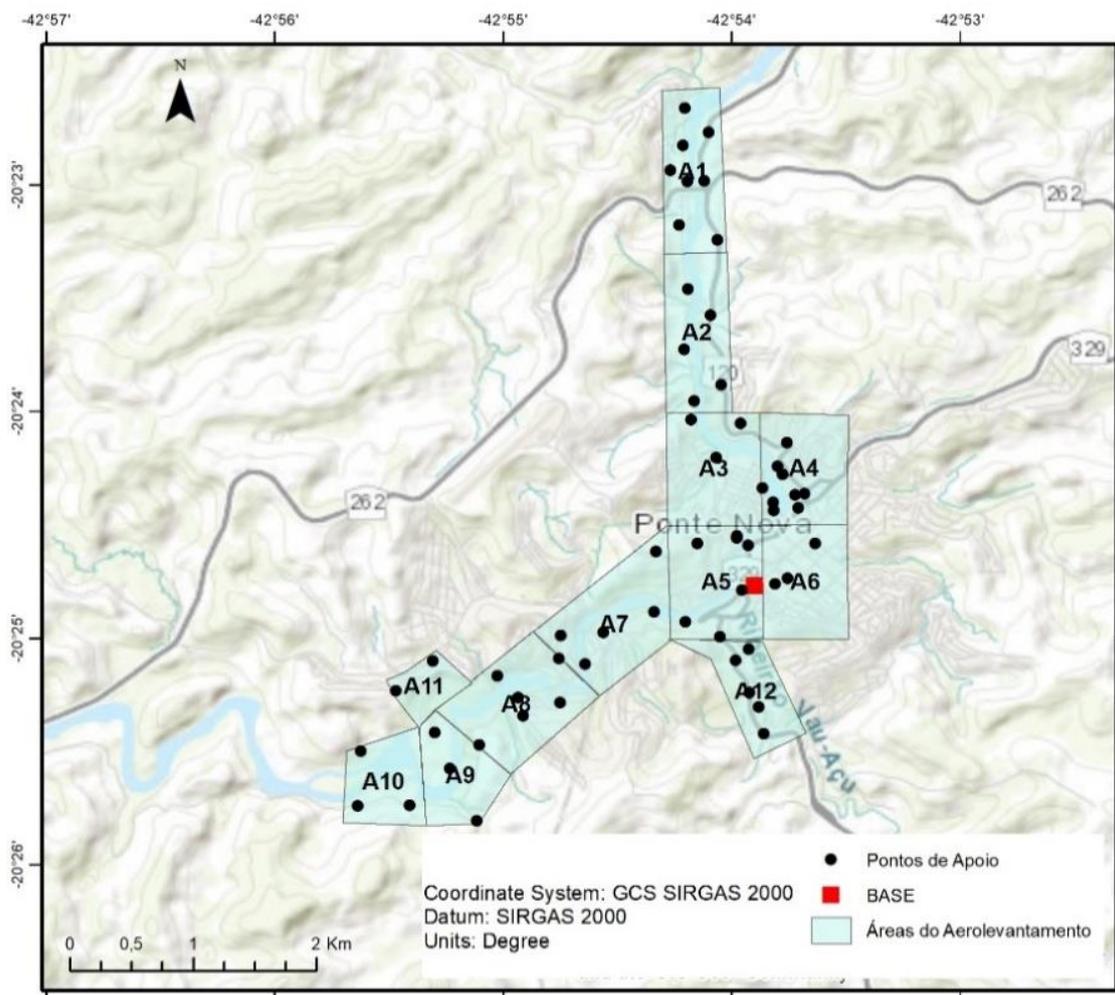
4.3 Aerolevanteamento: planejamento e processamento

Em estudo preliminar, delimitou-se a área de interesse e definiu-se a altitude média do terreno e detectaram-se possíveis problemas para o imageamento, como: obstáculos naturais, cabos elétricos, prédios altos, entre outros. E assim, conforme as instruções do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), realizou-se o planejamento do voo e para isso utilizou-se o aplicativo para sistema operacional Android o DroneDeploy para delimitar as áreas mapeadas.

O equipamento utilizado para o aerolevanteamento, Phantom 4 Pro modelo da DJI, possui embarcado um sistema inercial, receptor GPS/GLONASS (Sistema de Navegação Global por Satélite Americano/ Sistema de Navegação Global por Satélite Russo), piloto automático e ainda uma câmera acoplada de alta qualidade com sensor CMOS de 20 megapixels de uma polegada, conforme especificações da DJI.

Devido a limitação do equipamento, foi necessário dividir a área em doze partes (Figura 19).

Figura 19 – Aerolevantamento e pontos de apoio



Fonte: CPRM e Esri, HERE, Garmin, USGS, METI/NASA. Elaborado pelos autores (2019).

Para garantir o recobrimento entre as fotos e permitir a geração de modelos estereoscópicos utilizou-se sobreposição lateral e longitudinal de 65% e 75% respectivamente. A altura de voo padronizada foi de 120 metros, definiu-se este valor a partir da posição de decolagem. Ressalta-se ainda que a altura de voo interfere diretamente no GSD (*Ground Sample Distance*), que é a representação do pixel da imagem em unidades de terreno, ou seja, quanto maior a altura de voo, maior será o GSD. Para calcular o tamanho do pixel, considerou-se os seguintes elementos: a distância focal da câmera e altura de voo, conforme a equação (1).

$$GSD = \frac{H \cdot TP}{f} \quad (1)$$

onde TP é o tamanho do pixel no CCD (mm), f é a distância focal da câmera (mm) e H é a altura de voo (m).

Para o presente estudo utilizou-se uma câmera de 20 megapixel e distância focal de 24 mm e com tais características determinou-se um valor aproximado de GSD igual a 2,4 cm. Ressalta-se que na maioria das vezes o terreno não plano, e em caso mais específicos, como do

município de Ponte Nova, existe uma variação muito grande de altitude, ficando assim clara a variação também do nível de detalhamento. Uma forma de reduzir essa variação do GSD é dividir em mais voos, como mostrado na figura anterior (Figura 19).

No total adquiriu-se 3663 imagens, e na Figura 20, pode-se observar os pontos de aquisição de imagens e o exemplo de uma foto adquirida com o aerolevantamento, com cobertura de foto de 170m x 130m.

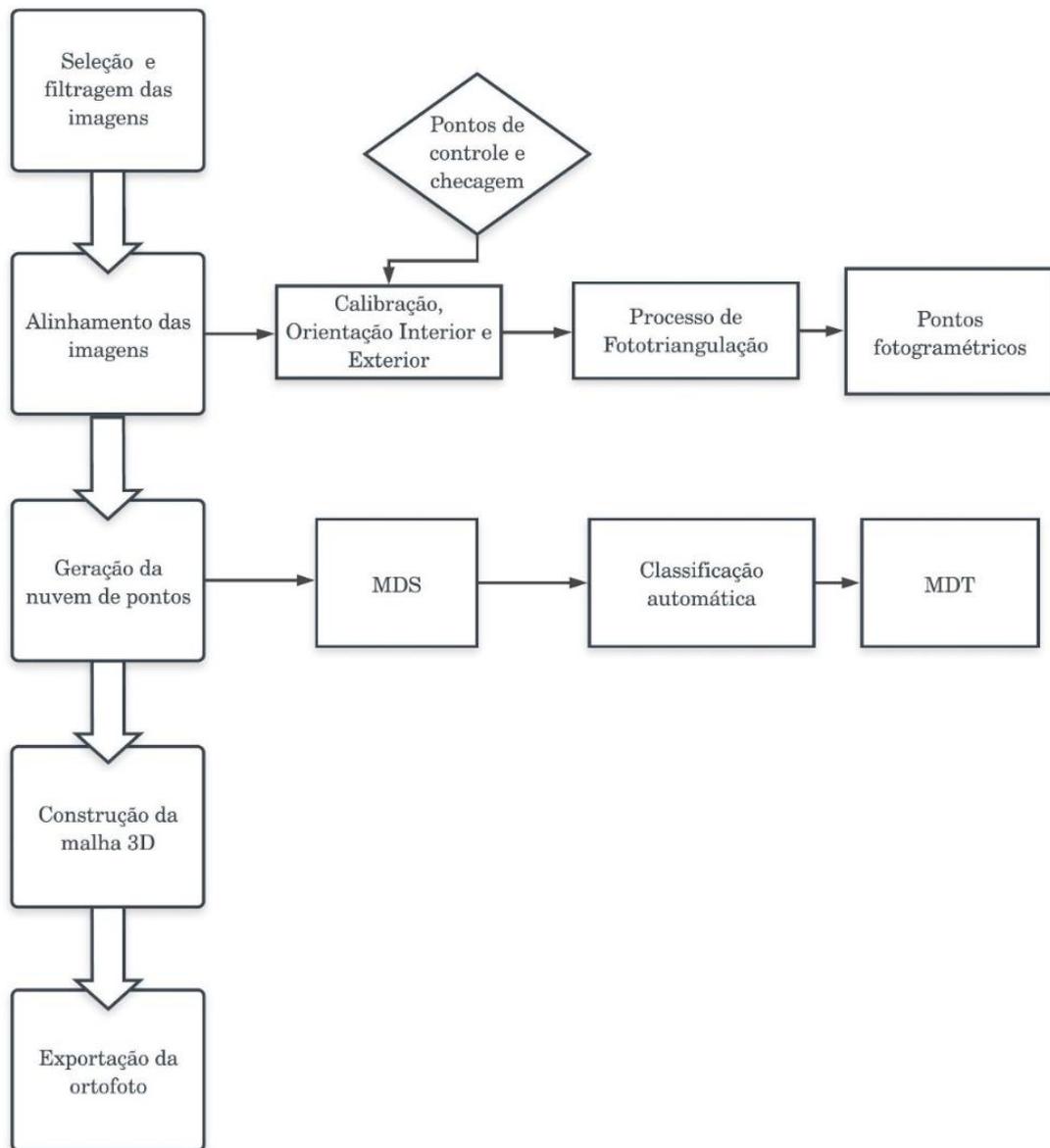
Figura 20 – Aquisição das imagens



Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

No processamento fotogramétrico utilizou-se o software Pix4Dmapper Trial, que seguiu conforme o fluxograma a seguir:

Figura 21 – Fluxograma do processamento das ortofotos e do MDT.



Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

Ressalta-se que, devido a razões comerciais, existem poucas informações disponíveis sobre o funcionamento e o algoritmo de restituição fotogramétrica usados pelo software, questão também observada por OLIVEIRA (2017).

Inicialmente é realizada uma pré-seleção das imagens, ou seja, excluiu-se do processamento as fotografias com falta de iluminação e com sombras. Assim reduz possíveis erros durante a fase de processamento dos dados.

Em primeiro momento as imagens são carregadas no software e é feita uma orientação relativa delas. Nessa etapa, o software determina a posição e orientação de cada uma das imagens e é nesse momento que são inseridos os pontos de apoio. Uma vez que se introduzem as coordenadas dos pontos de apoio no terreno, uma escala é definida para o modelo fotogramétrico. O modelo até então orientado de forma relativa passa a ser orientado de forma absoluta.

Em seguida gerou-se as nuvens de pontos, utilizando o algoritmo *SfM – Structure from Motion*, implementado no software *Pix4D Mapper*. Este algoritmo faz o alinhamento automático das fotografias aéreas sobrepostas, gerando calibração entre as imagens e posteriormente extração das nuvens de pontos. Os pontos são extraídos por correspondência de região, o que se gera uma nuvem de pontos densa através das triangulações entre as imagens calibradas.

Na terceira etapa é feita então a estruturação dos pontos a partir da filtragem e classificação da nuvem de pontos, com isso, é criada uma malha triangular irregular. Neste método, cria-se uma superfície a partir de pontos espaçados irregularmente, adaptando à densidade de pontos detectados no processamento de obtenção dos pontos homólogos. A partir disso, é possível representar o terreno mapeado tridimensional, possibilitando representar o modelo digital de superfície (MDS) e modelo digital de terreno (MDT). Com estes modelos é possível extrair diretamente informações planimétricas para cálculo de perímetro, áreas e volume, obtenção de perfis e seções transversais.

O último produto gerado no processamento é o ortofotomosaico, que é a junção das imagens, o programa realiza este procedimento de forma automática e as linhas de transição entre as imagens são suavizadas.

4.4 Análise da Precipitação

Para contribuir com o entendimento de ocorrência das inundações, buscou-se informações climáticas da região na qual o município de Ponte Nova está inserido, que é o clima tropical de altitude, típico de áreas elevadas e com alta concentração de chuva no verão, com uma temperatura média anual de 20°C.

Realizou-se um estudo sobre a pluviosidade da região, englobando os meses com maiores concentrações de chuva: novembro, dezembro e janeiro, entre o período de 1995

a 2016. Para isso, utilizaram-se dos dados da estação pluviométrica (02042018) localizada em Ponte Nova. Esta estação é operada pela ANA (Agência Nacional de Água) e pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM, que estão disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb).

4.5 Mancha de Inundação

Para a geração a mancha de inundação, adquiriu-se inicialmente as coordenadas dos pontos de inundações dos dois eventos, dezembro de 2008 e janeiro de 2012, disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM, através da Superintendência Regional de Belo Horizonte. Para compatibilizar com o aerolevanteamento, fez-se necessário a transformação das altitudes geométricas (elipsoidais) em altitudes ortométricas (geoidais), apoiado no aplicativo fornecido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), para transformações de altitudes através do modelo MAPGEO2015.

Tendo estes pontos como referência, geraram-se três perfis transversais, denominados como principais, utilizando o MDT gerado pelo aerolevanteamento. A localização destes perfis baseou-se nas informações de posicionamento dos pontos de inundações fornecidas pela CPRM.

Como os pontos fornecidos pela CPRM não foram quantitativamente suficientes, fez-se necessário estimar mais pontos através do cálculo da área da área transversal inundada. Para isso, realizou-se a interpolação pelo método IDW (*Inverse Distance Weighted*) utilizando os pontos dos picos da inundação da CPRM. A partir destes pontos estimados e os pontos adquiridos da CPRM, gerou-se um mapa da área molhada e através de uma álgebra de mapas, subtraiu-se o MDT-aerolevanteamento do mapa da área molhada. Fez esse procedimento tanto para os anos de 2008 e 2012, obtendo assim o mapa de inundação para os respectivos anos.

4.6 Validação da mancha de inundação

O processo de validação da mancha de inundação consiste na comparação entre os pontos fornecidos pela CPRM, que contém as altitudes ortométricas das cheias históricas

(2008 e 2012), com as altitudes ortométricas das cheias calculadas no processo anterior. Ressalta-se que os pontos utilizados na etapa anterior para geração da área molhada da seção transversal não entraram no procedimento de validação.

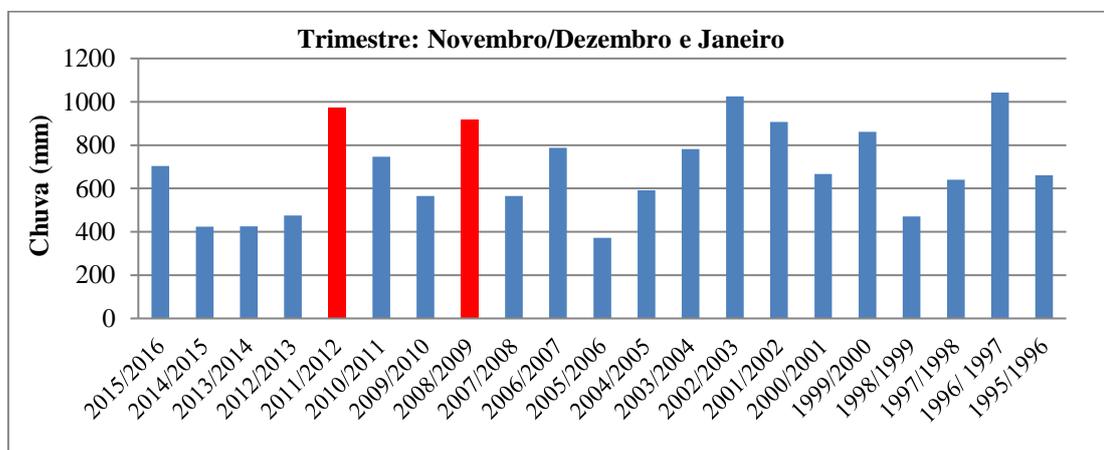
Tendo em vista que as coordenadas fornecidas pela CPRM foram adquiridas por métodos tradicionais de topografia e são dados conhecidos e validados em campo, toma-se este dado como um resultado esperado.

Nesta etapa pode-se obter a diferença altimétrica entre o resultado esperado e o calculado. E a partir das informações encontradas, avaliar a qualidade do produto gerado pelo aerolevante e assim obter uma crítica quanto ao uso da tecnologia (VANT) para a gestão de riscos.

5. RESULTADOS

5.1 Análise da Precipitação

Os resultados evidenciam que os maiores volumes ocorreram nos trimestres de 1996/1997 e 2002/2003 com chuvas de 1042,4 e 1025,2 mm, respectivamente, mas, nesses trimestres as chuvas foram espaçadas e tiveram o escoamento adequado. Porém, nos trimestres de 2008/2009 e 2011/2012 com volume de chuva total de 919,7 e 973,6 mm, respectivamente, as chuvas foram concentradas e volumosas ocasionando picos de inundações, como pode ser observado na figura 22. **Figura 22 – Chuva Total do Trimestre**



Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA). Elaborado pelos autores (2019).

Ressalta-se a chuva média anual de Ponte Nova de aproximadamente 1270 mm, no período de estudo de 40 anos realizado entre 1976 a 2015, a partir de dados disponibilizados pela ANA. Destaca-se ainda, o ano de 2008 e 2012 com chuvas totais anuais com valores de 1618,8 e 958,6 mm, respectivamente.

Visando entender a variabilidade das chuvas na área de estudo e seu impacto na ocorrência das inundações de 2008 e 2012, foi realizado o estudo diário nos 3 dias, sendo estes o dia da inundação mais os 2 dias anteriores a esse fenômeno. Destaca-se a altura pluviométrica de 70mm ocorrido no dia 16/12/2008 e de 45,8mm ocorrido no dia 02/01/2012, que antecedem o pico da inundação. O volume total de chuva do período de estudo chegou a 134,3 e 115,9 mm nas enchentes de 2008 e 2012, respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1 – Cálculo do volume de chuva no período de enchente 2008 e 2012

Enchente de 2008 - dia 17/12/2008		
Dias	Chuvas (mm)	Chuva Total Mensal
15/12	12,3	
16/12	70	428,4 mm
17/12	52	
Total	134,3	
Enchente de 2012 - dia 03/01/2012		
Dias	Chuvas (mm)	Chuva Total Mensal
1/01	18,6	
2/01	45,8	279 mm
3/01	51,5	
Total	115,9	

Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA). Elaborado pelos autores (2019).

5.2 Levantamento Geodésico: apoio de campo

A partir dos pós-processamento, utilizando a ferramenta PPP – IBGE, obteve o seguinte resultado da base:

Figura 23 - Processamento PPP - IBGE da Base

Coordenadas SIRGAS						
	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (é a que deve ser usada) ⁴	-20° 24' 46,1623"	-42° 53' 53,9824"	462,60	7741431.346	719304.496	-45
Na data do levantamento ⁵	-20° 24' 46,1550"	-42° 53' 53,9844"	462,60	7741431.571	719304.441	-45
Sigma(95%) ⁶ (m)	0,002	0,004	0,007			
Modelo Geoidal	MAPGEO2015					
Ondulação Geoidal (m)	-7,90					
Altitude Ortométrica (m)	470,50					

Fonte: PPP – IBGE (2018)

Com as informações da base corrigida e ajustada, obtiveram-se os pontos de apoio, conforme a tabela a seguir:

Tabela 2 – Pontos de apoio

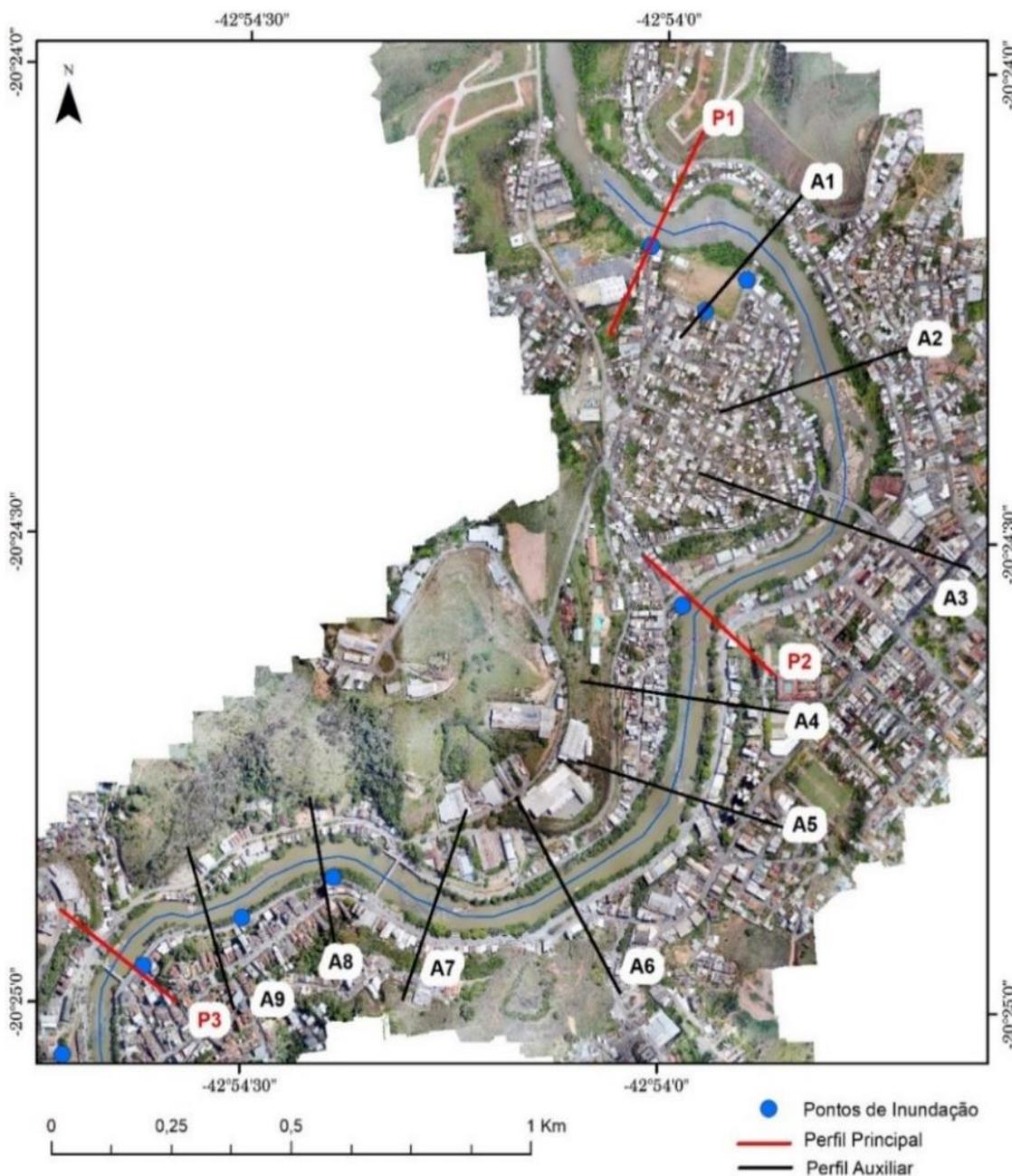
Ponto	Latitude	Longitude	Alt. Elipsoidal (m)	Alt. Ortométrica (m)	Coord E (m)	Coord N (m)
1	-20,428995072	-42,923454680	415,047	422,921	716659,099	7739674,116
2	-20,429033881	-42,927267056	408,173	416,045	716261,143	7739674,851
3	-20,425021237	-42,927030948	426,321	434,205	716291,398	7740118,822
4	-20,420561660	-42,924448224	507,657	515,555	716567,211	7740609,182
5	-20,430120628	-42,918574816	418,804	426,675	717166,835	7739543,040
6	-20,423613064	-42,921606497	401,549	409,440	716859,543	7740267,575
7	-20,426291142	-42,920540725	404,410	412,293	716967,026	7739969,646
8	-20,422387480	-42,915192031	451,707	459,593	717530,777	7740394,781
9	-20,424845195	-42,919515165	403,693	411,581	717076,097	7740128,386
10	-20,421445399	-42,912476766	398,971	406,861	717815,512	7740495,487
11	-20,404038051	-42,896599372	395,641	403,576	719497,440	7742401,706
12	-20,419461708	-42,917039591	411,062	418,966	717342,047	7740721,174
13	-20,424556400	-42,918371043	414,265	422,154	717195,919	7740158,847
14	-20,418350550	-42,921776714	450,319	458,225	716849,155	7740850,469
15	-20,418579132	-42,910633261	395,988	403,888	718011,971	7740810,396
16	-20,418172178	-42,912577824	405,050	412,951	717809,573	7740858,036
17	-20,410312815	-42,905468824	497,424	505,333	718562,706	7741718,786
18	-20,414775810	-42,905605243	394,545	402,439	718542,163	7741224,817
19	-20,416255511	-42,909346393	423,662	431,550	718149,569	7741065,960
20	-20,400616752	-42,902941831	407,661	415,605	718840,191	7742788,983
21	-20,400915526	-42,899329378	463,706	471,651	719216,877	7742751,084
22	-20,409299101	-42,899579827	393,223	401,138	719178,863	7741823,174
23	-20,403441591	-42,901102486	391,455	399,390	719028,207	7742473,760
24	-20,405667251	-42,897731284	392,522	400,451	719376,972	7742222,831
25	-20,406697623	-42,896956999	392,943	400,869	719456,337	7742107,711
26	-20,402303589	-42,895948420	404,896	412,837	719567,852	7742592,879
27	-20,407109816	-42,895100522	393,780	401,705	719649,545	7742059,590
28	-20,409746182	-42,902457626	456,057	463,970	718877,830	7741777,512
29	-20,409710049	-42,893894824	397,735	405,651	719771,713	7741770,073
30	-20,409879207	-42,898749583	394,590	402,504	719264,707	7741757,835
31	-20,415510584	-42,903321497	394,826	402,719	718779,505	7741140,420
32	-20,413182640	-42,899242766	395,273	403,175	719208,546	7741392,732
33	-20,412312032	-42,895906639	425,005	432,911	719558,017	7741484,668
34	-20,416580914	-42,900811324	394,404	402,294	719040,005	7741018,562
35	-20,413587873	-42,904439403	407,953	415,852	718665,534	7741354,795
36	-20,421058209	-42,915544898	404,761	412,651	717495,815	7740542,427
37	-20,416492562	-42,912422107	419,721	427,606	717828,192	7741043,799
38	-20,412702053	-42,896803418	440,458	448,363	719463,855	7741442,684

Fonte: Autor (2021)

5.3 Mancha de Inundação

Para a geração da mancha de inundação, inicialmente gerou-se os perfis transversais principais, conforme o mapa de localização na figura 24.

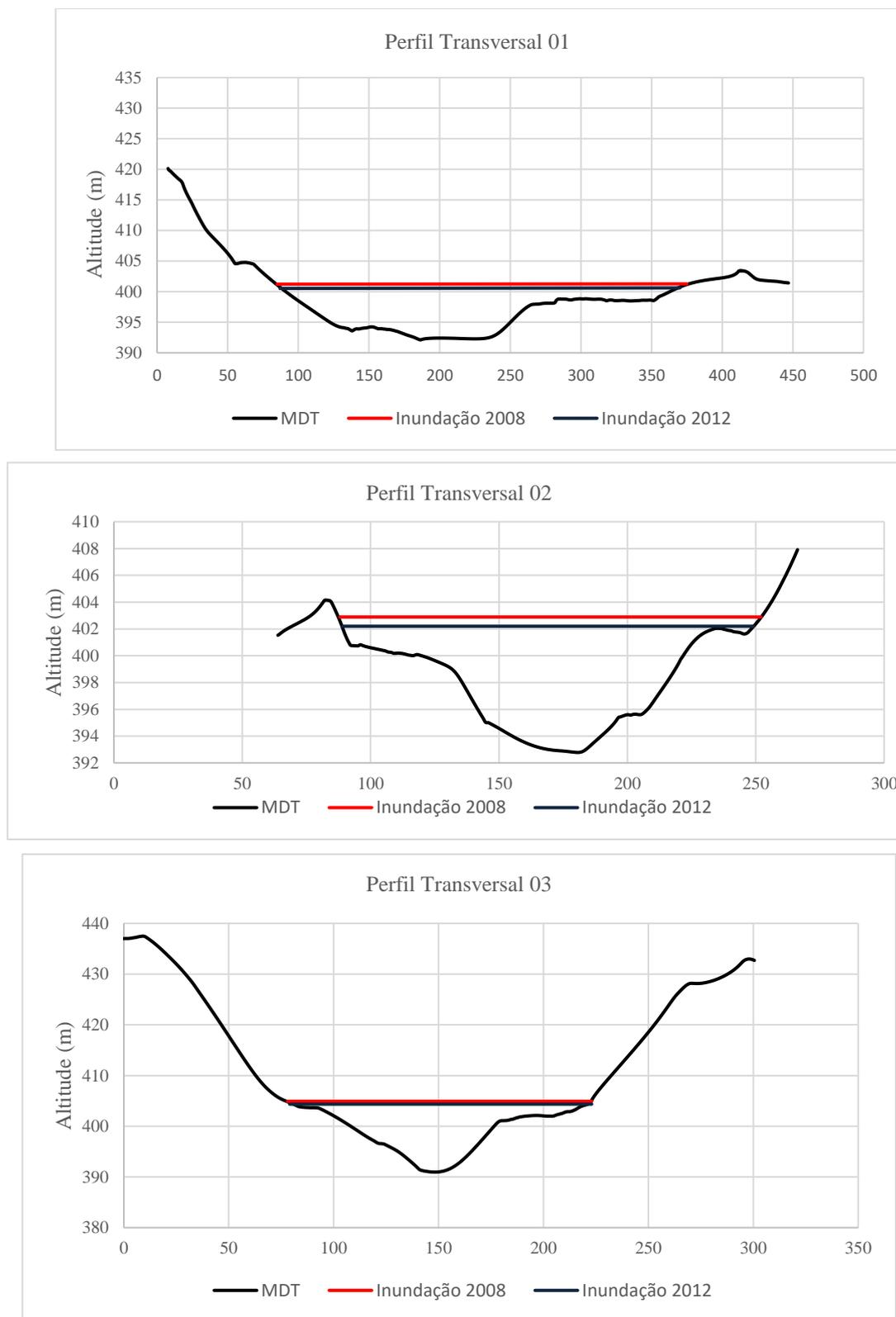
Figura 24 – Perfis Transversais e Pontos de Inundação



Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

Na figura 25 pode-se observar melhor as seções transversais e os eventos de inundação (2008 e 2012).

Figura 25 – Perfis Transversais



Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

A partir das características geométricas de cada perfil ou ainda, de cada seção transversal, foi possível calcular área inundada (Tabela 3).

Tabela 3 – Área dos perfis transversais

	Área inundada 2008 (m ²)	Área inundada 2012 (m ²)
Seção Transversal 01	1482,85	1282,67
Seção Transversal 02	891,06	754,09
Seção Transversal 03	872,35	791,77

Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

Ressalta-se que para obtenção de um melhor resultado, tendo em vista que os pontos fornecidos pela CPRM não são quantitativamente suficientes, foram necessários traçar mais nove perfis ao longo do trecho do rio. Estes novos perfis, denominados perfis auxiliares, serviram para estimar novos pontos de inundação a partir do cálculo da área da seção.

Através da interpolação pelo método da ponderação do inverso do quadrado (IDW), utilizando os perfis principais como base, foi possível assim estimar a área da seção e a cota de inundação nos demais locais. (Tabela 3).

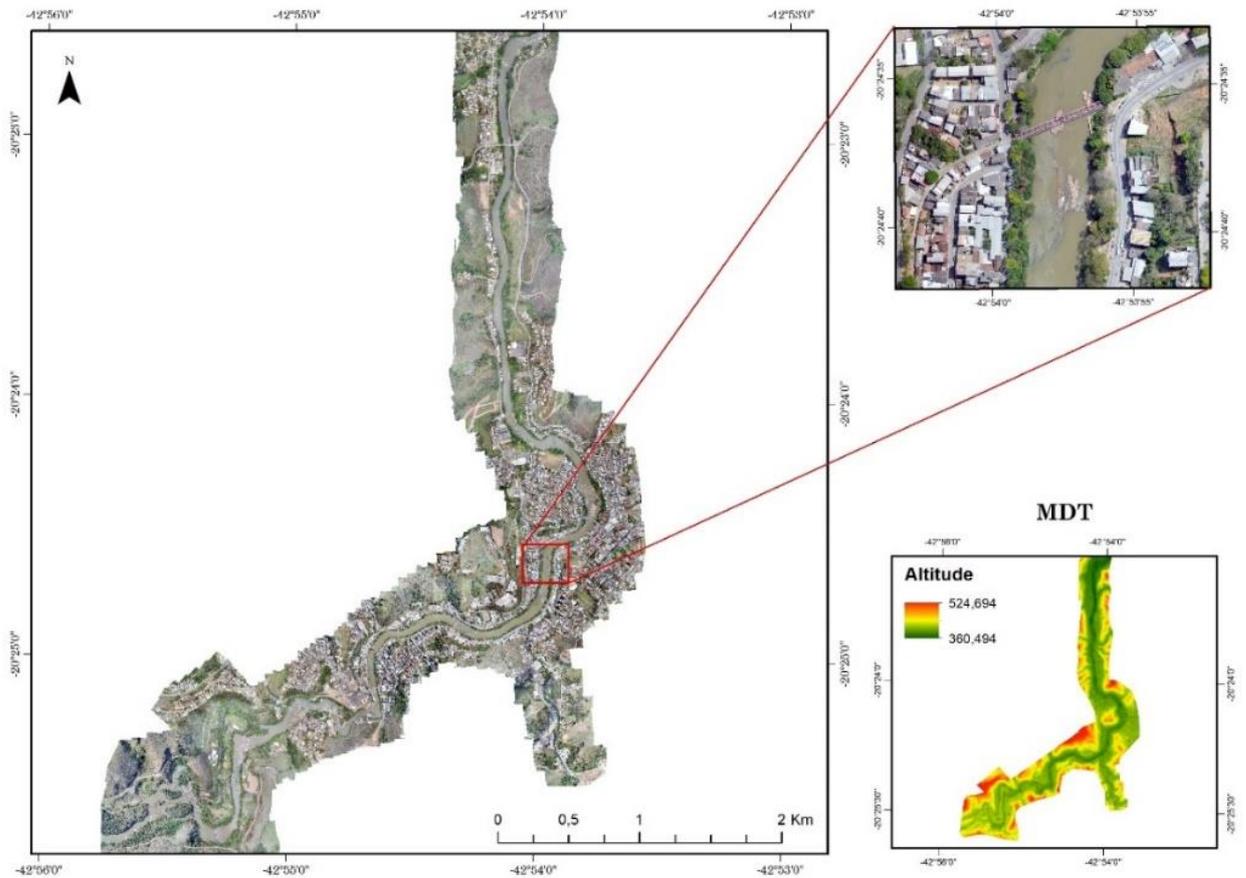
Tabela 4 – Área das seções transversais e cotas de inundações estimadas

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Área 2008 (m²)	1423	1214	1006	911	943	969	955	928	882
Cota 2008 (m)	401,8	401,5	404,5	403,2	403,6	403,4	405,8	404,2	405,8
Área 2012 (m²)	1233	1042	855	773	805	837	839	825	798
Cota 2012 (m)	401	400,6	403,5	402,5	402,8	402,7	404,9	403,3	405,1

Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

A área mapeada da planície de inundação foi de aproximadamente de 7 km², com a aquisição das 3663 fotos. Como houve variações da altura de voo em todo o mapeamento, o GSD gerado foi médio, no valor de 5,55 cm/pixel e o erro médio do georreferenciamento foi de aproximadamente 0,50 m. Na figura 26 é possível verificar a área mapeada e os produtos gerados.

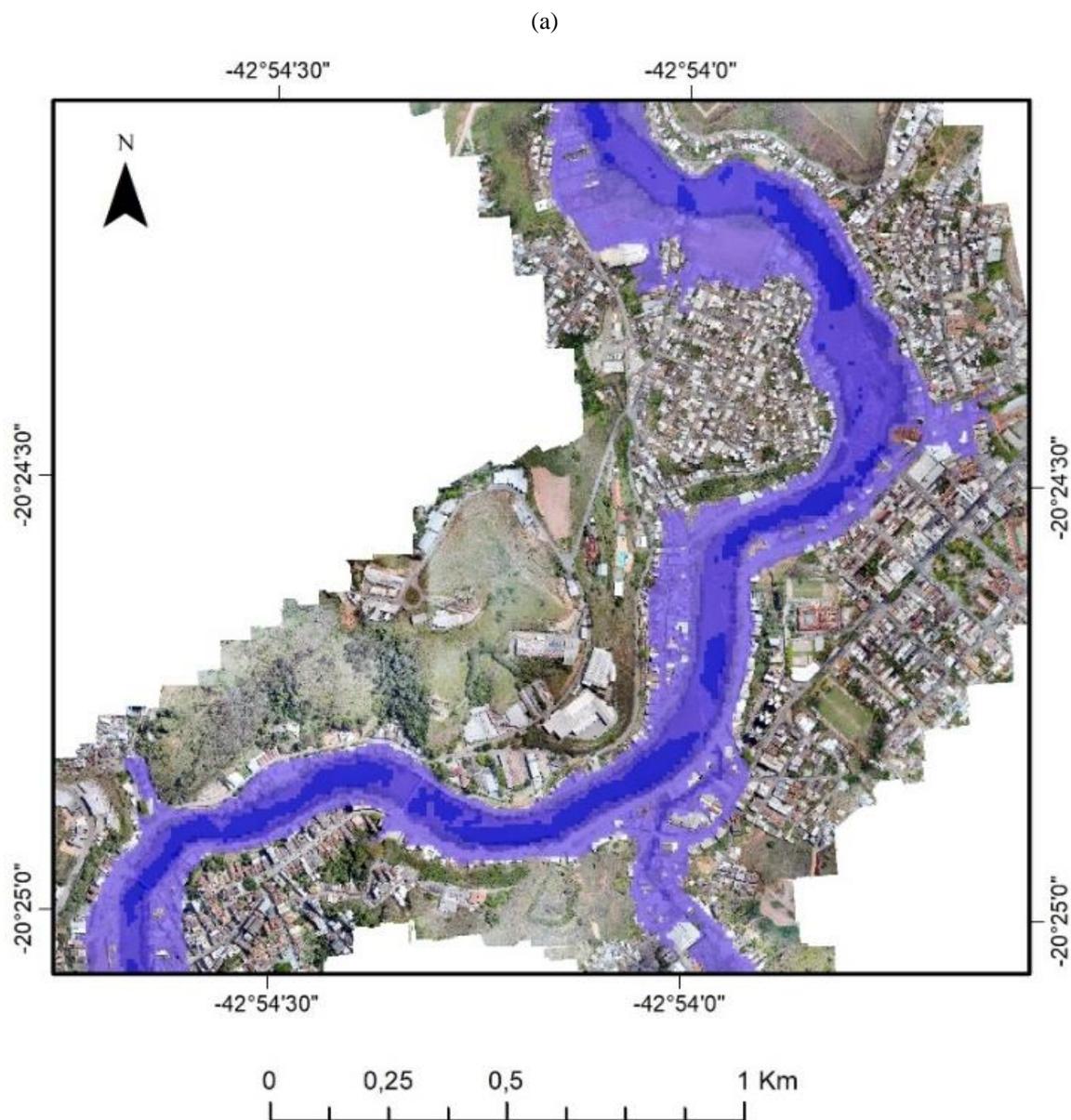
Figura 26 – Produtos do Aerolevantamento

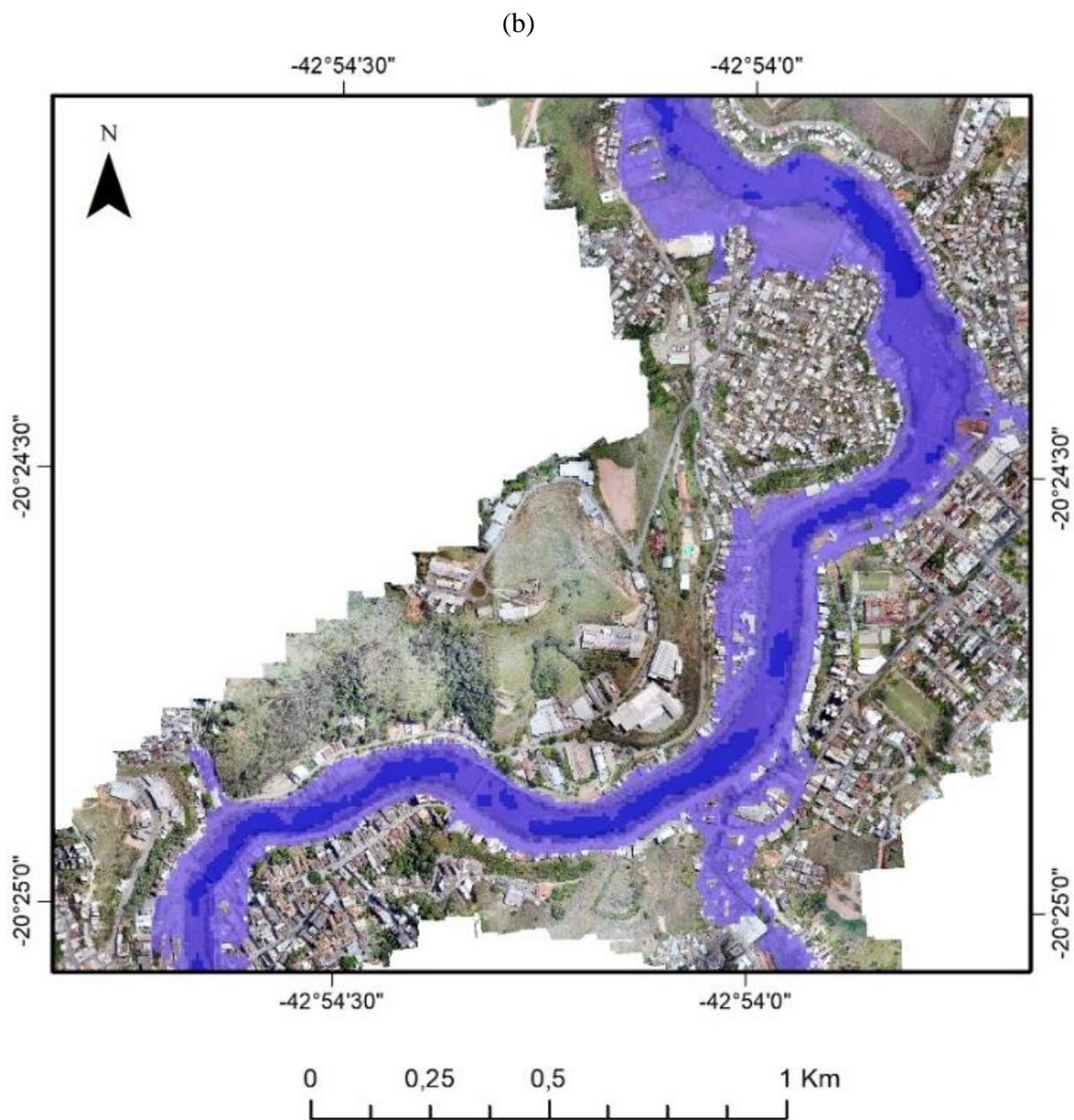


Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

Como descrito no processo metodológico, a partir da subtração do MDT (Aerolevantamento) da superfície gerada pelo método de IDW, foi possível criar os mapas de inundação para os eventos dezembro/2008 e janeiro/2012 (Figura 27).

Figura 27 – Mancha de Inundação 2008 (a) e 2012(b)





Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

5.4 Validação da Mancha

Na tabela a seguir (Tabela 5), tem-se o comparativo entre os dados fornecidos pela CPRM, que é o resultado esperado, e os dados obtidos através dos produtos gerados pelo aerolevanteamento, que é o calculado.

Tabela 5 – Tabela comparativa dos dados obtidos e o esperado

Evento de 2008			
<i>Pontos</i>	<i>Altitude esperada (m)</i>	<i>Altitude calculada (m)</i>	<i>Diferença Altimétrica (m)</i>
1	401,272	401,453	-0,181
2	404,16	404,19	-0,03
3	404,8	404,31	0,49
Evento de 2012			
<i>Pontos</i>	<i>Altitude esperada (m)</i>	<i>Altitude obtida (m)</i>	<i>Erro (m)</i>
1	400,613	400,566	0,047
2	403,39	403,533	-0,143
3	404,191	404,205	-0,014

Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

Os valores apresentados na tabela 4 já eram esperados, isso devido a qualidade do produto gerado pelo aerolevanteamento. Sendo que a diferença altimétrica do esperado para o calculado não foram superiores a 50 cm. Nota-se ainda que não houveram tendências nos resultados, o que pode ser justificado pelo próprio erro do aerolevanteamento, dos dados fornecidos pela CPRM e até mesmo pela interpolação no *software* de geoprocessamento. O ideal seria a aquisição de mais pontos de validação ou ainda, mais pontos para o cálculo da área da seção transversal inundada, e aliada a uma modelagem hidrológica, teriam minimizado o erro.

Para o processo de validação das manchas de inundação de 2008 e 2012, este processo metodológico foi eficiente, visto que houve subsídio de aerolevanteamento e ressalta-se ainda que o GSD gerado foi pela média das alturas dos voos, chegando a um valor de 5,55 cm/pixel. Tendo em vista as imagens aéreas disponíveis de forma gratuita, o aerolevanteamento usando o VANT, atendeu o propósito por ser uma tecnologia de baixo custo.

6. CONCLUSÃO

O uso do VANT para a aquisição dos dados apresentou benefícios, assim como: redução de custos relacionados à aquisição das imagens, melhor resolução espacial e temporal se comparado com o uso de imagens de satélites gratuitas. Sua principal limitação, é a baixa autonomia de tempo de voo, explicando a necessidade de dividir a área em doze partes, facilitando o planejamento e controle das áreas mapeadas.

Conforme HORA e GOMES (2009), os mapas de inundação se configuram em um instrumento importante na prevenção, controle e gestão das inundações. Através deles é possível definir as áreas de risco.

E neste sentido, o município apresenta um vasto histórico de enchente, desde a década de 70, que estão associados também às ocupações desordenadas principalmente na área urbana, sendo que as enchentes de 2008 e 2012 destacaram-se pela elevação do rio e desastres.

Ponte Nova (MG), por estar inserido em uma região com a estação chuvosa bem definida, principalmente no verão, torna o planejamento para época de cheia mais fácil. Porém, vale destacar que a alta declividade favorece o surgimento picos de enchentes, ou seja, a água chega na região central da cidade com mais velocidade.

Este estudo realizou com êxito o objetivo de gerar o mapa da mancha de inundação para os eventos ocorridos em dezembro de 2008 e janeiro de 2012, com dados originários de aerolevanteamento. Apresentando uma base de dados de qualidade com o intuito de fornecer dados para planejamentos e tomada de decisões sobre ações a serem desenvolvidas em eventos futuros, reduzindo perdas econômicas e até possíveis vítimas.

Sendo assim, os resultados encontrados condizem com a realidade identificada em campo, que permite afirmar a necessidade de medidas preventivas frente ao problema. E a população localizada no centro urbano enfrenta os maiores impactos, em função da localização às margens do rio Piranga e a vulnerabilidade habitacional.

Referências

- AIMON, J.G.S. **ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DO RISCO À INUNDAÇÃO NA ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE URUGUAIANA/RS**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Santa Maria, 2017. 109p.
- ANA. Agência Nacional de Águas. Site <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>, acessado em 14 de novembro 2019.
- Ashley, R.M.. Building Knowledge for a Climate Change. The impacts of climate change on the built environment. Research Agenda. EPSRC. 2003
- BRITO, J. L. N. e S; COELHO, L. C. T., Fotogrametria Digital – Rio de Janeiro – Instituto Militar de Engenharia, 2002
- BUFFON, E., SAMPAIO, T., PAZ, O. **Veículo aéreo não tripulado (VANT) - aplicação na análise de inundações em áreas urbanas**. GOT - Journal of Geography and Spatial Planning 13 (30 de junho de 2018): 85–108. <https://doi.org/10.17127/got/2018.13.004>.
- CAMPOY, P., CORREA, J.F., MONDRAGÓN, I., MARTÍNEZ, C., OLIVARES, M., MEJÍAS, L. and ARTIEDA, J. (2009), “**Computer vision onboard UAVs for civilian tasks**”, J. Intell. Robot. Syst., 54(1-3), 105-135.
- CAJAZEIRO, J. M. D. **ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE À FORMAÇÃO DE INUNDAÇÕES NAS BACIAS E ÁREAS DE CONTRIBUIÇÃO DO RIBEIRÃO ARRUDAS E CÓRREGO DA ONÇA EM TERMOS DE ÍNDICES MORFOMÉTRICOS E IMPERMEABILIZAÇÃO**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Geografia. 2012. 104p.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M.V. Introdução à Ciência da Geoinformação, 2001. Disponível em: www.inpe.br.
- CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S. e OGURA, A. T. (Organizadores). **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Brasília, Ministério das Cidades, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 176 pp, 2007
- CHAVES, M. A., **Modelos Digitais De Elevação Hidrologicamente Consistentes Para A Bacia Amazônica**, 2002. Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa. Disponível em: www.bibliotecaflorestal.ufv.br.

- CIRILO, J. A. et al. **Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 7, n. 4, 2014, p. 755-763.
- COELHO, L.; BRITO, J. N. **Fotogrametria digital**. Ed. UERJ. 2007. 196 p.
- DECEA. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **AERONAVES NÃO TRIPULADAS E O ACESSO AO ESPAÇO AEREO**. ICA 100 – 40. 3 de janeiro, 2019. 56p.
- EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE. **Satélites de Monitoramento**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2013. Site < <http://www.sat.cnpm.embrapa.br>>, acessado em 25 de novembro de 2019.
- 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, 2015, p. 1437-1455.
- FERNANDEZ, P. A. J. **AVALIAÇÃO DO RISCO DE INUNDAÇÃO EM ZONAS URBANAS COM A INTEGRAÇÃO DE DADOS LIDAR E CARTOGRAFIA A ESCALA GRANDE**. Tese de doutorado. Universidade de Évora. Instituto de Investigação e Formação Avançada. Évora, 2015. 267p.
- Gladwell, J.S. and Sim, L.K. **Tropical Cities: managing their water**. IHP Humid tropics Programme Series no. 4, IHP-UNESCO. 1993.
- GRAÇA, N. L. S. S. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE VOO NA OBTENÇÃO DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS EMPREGANDO RECOBRIMENTO AÉREO COM VANT E TÉCNICA FOTOGRAMÉTRICA SFM**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná. Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. 2019. 240p.
- HORA, S. B.; GOMES, R. L. **MAPEAMENTO E AVALIAÇÃO DO RISCO A INUNDAÇÃO DO RIO CACHOEIRA EM TRECHO DA ÁREA URBANA NO MUNICÍPIO DE ITABUNA/BA**. Sociedade & Natureza, Uberlândia, 21 (2): 57-75, ago. 2009
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **ESPECIFICAÇÕES E NORMAS PARA LEVANTAMENTOS GEODÉSICOS ASSOCIADOS AO SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO**. Rio de Janeiro, 2017.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Site < <https://www.ibge.gov.br/>>, acessado em 25 de novembro de 2019.

- LIMA, L. A. **AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE GEORREFERENCIAMENTO DIRETO EM MAPEAMENTO AEROFOTOGRAFAMÉTRICO**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. 2016. 157p.
- LONGHITANO, G. A. **VANTS PARA SENSORIAMENTO REMOTO: APLICABILIDADE NA AVALIAÇÃO E MONITORAMENTO DE IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS POR ACIDENTES COM CARGAS PERIGOSAS**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2010. 148p.
- LUZ, C. C & ANTUNES, A. F. B. Validação da tecnologia VANT na atualização de bases de dados cartográficos geológicos – Estudo de caso: Sistema cárstico do rio João Rodrigues. *Revista Brasileira de Cartografia*, N0 67/7: 1439-1452, 2015.
- MONICO, J.F.G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2.ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476p.
- MURPHY, R.R., STEIMLE, E., HALL, M., LINDEMUTH, M., TREJO, D., HURLEBAUS, S., MEDINA-CETINA, Z. and SLOCUM, D. (2011), “**Robot-assisted bridge inspection**”, *J. Intell. Robot. Syst.*, 64(1), 77-95
- NASCIMENTO, S. H. A. S. **ANÁLISE DA MODELAGEM HIDRÁULICA DO CANAL DO RIO SARACURA, LAJEDINHO-BA, UTILIZANDO O MODELO DIGITAL DE TERRENO OBTIDO POR IMAGEAMENTO VANT NA DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE RISCO DE INUNDAÇÃO**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Bahia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental Urbana. Salvador, 2016. 77p.
- OLIVEIRA, D. R., CICERELLI, R.E., ALMEIDA, T. & MAROTTA, G.S. Geração de Modelo Digital do Terreno a partir de imagens por veículo aéreo não tripulado. **Revista Brasileira de Cartografia**, No 69/6: 1143-1151, 2017.
- OLIVEIRA, D. V.; BRITO, J. L. S. Avaliação da Acurácia Posicional de Dados Gerados por Aeronave Remotamente Pilotada. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 71, n. 4, p. 934-959, 13 dez. 2019.

- PEREIRA, A.; GOMES, A.; ALBERTI, A. **Vantagens da utilização de dados ALS (LiDAR) na caracterização morfológica das vertentes costeiras da Galiza (Espanha): aplicação ao setor de Mougás.** Revista de Geografia e Ordenamento do Território (GOT), n.º 4 (dezembro). Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território, 2013, p. 223-248.
- PINTO, L.V.A.; BOTELHO, S.A.; DAVIDE, A.C.; FERREIRA, E. **Estudos das nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz**, Lavras, MG, 2004.
- PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D.; **Escoamento Superficial**. 2ª edição, 4ª impressão. 2012.
- RATHINAM, S., KIM, Z.W. and SENGUPTA, R. (2008), “**Vision-based monitoring of locally linear structures using an unmanned aerial vehicle**”, Journal of Infrastructure Systems, 14(1), 52-63
- SARTORI, R. Z. **AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE MODELOS HIDRODINÂMICOS PARA PREVISÃO DE INUNDAÇÕES: UM ESTUDO DE CASO DE MUNICÍPIO DE GETÚLIO VARGAS – RS**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Fronteira Sul - Campus Erechim. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental. Erechim, 2018 148p.
- SILVA, L. A. O. e FIALHO, E. S. Problemas ocasionados pela enchente de dezembro de 2008 em Ponte Nova – MG. XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Universidade Federal de Viçosa – UFV/MG, 2009.
- SILVA, T. C. **MAPEAMENTO DAS MANCHAS DE INUNDAÇÃO PARA A CIDADE DE MATIA BARBOSA – MG**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Juiz de Fora. Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária. Juiz de Fora, 2016. 69p.
- Serviço Geológico do Brasil – SGB – CPRM, **Sistema de Alerta Contra Enchentes da Bacia do Rio Doce**. Relatório Técnico da operação do sistema de alerta período de dezembro de 2008 a abril de 2009, VOLUME I, 2009. 84p.
- Serviço Geológico do Brasil – SGB – CPRM. Site < <https://www.cprm.gov.br/sace/>>, acessado em 21 de novembro de 2019.
- Starek M, Gingras M, Jeffress G. **Application of Unmanned Aircraft Systems for Coastal Mapping and Resiliency**. 2019. p. 109–25.
- TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria Básica**. Ed. do autor, Presidente Prudente, 2012.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2ª Edição. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001.

WINTER, L. G. ELABORAÇÃO DE MANCHAS DE INUNDAÇÃO NA ÁREA CENTRAL DE PATO BRANCO CONSIDERANDO ASPECTOS URBANÍSTICOS. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Pato Branco, 2018. 137p.