

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

Marciano Carneiro

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA A OBTENÇÃO DE AEROLEVANTAMENTO  
DE BAIXO CUSTO POR VANT'S, COM AUSÊNCIA DE REFERENCIAS FÍSICAS.**

**Porto Alegre, RS**

**2021**

Marciano Carneiro

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA A OBTENÇÃO DE AEROLEVANTAMENTO  
DE BAIXO CUSTO POR VANT'S, COM AUSÊNCIA DE REFERENCIAS FÍSICAS.**

Tese de Doutorado em Engenharia apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de doutor.

Área de concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalúrgica Extrativa.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

**Porto Alegre, RS**

**2021**

## VERSO DA FOLHA DE ROSTO

Ficha Catalográfica do seu trabalho. Segue o link disponibilizado pelo SBUFRGS:  
<https://www.ufrgs.br/bibliotecas/ferramentas-de-producao/ficha-catalografica/>

Marciano Carneiro

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA A OBTENÇÃO DE AEROLEVANTAMENTO DE BAIXO CUSTO POR VANT'S, COM AUSÊNCIA DE REFERENCIAIS FÍSICAS.**

Tese de Doutorado em Engenharia apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de doutor.

Área de concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalúrgica Extrativa.

Tese defendida e aprovada em: 28 de outubro de 2021.

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni - Orientador  
UFRGS

---

Prof. Dr. Diego Machado Marques  
DEMIN - UFRGS

---

Prof. Dr. Alexandre Felipe Bruch  
Universidade Federal de Pelotas - UFPEL

---

Prof. Dr. Everton Silva  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

## **DIDICATÓRIA**

À minha família,  
Kelly, esposa, Filippo e Sophia, filhos, mãe Valmira e pai José (*in memoriam*),  
pelo apoio e companhia ao longo da caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, professor, Rodrigo Peroni, que agradeço pela oportunidade e pelos seus conhecimentos e auxílio que me fizeram crescer na minha vida acadêmica.

Aos professores do PPGE3M, por todos os ensinamentos transmitidos e pela contribuição no meu processo de aprendizado.

A minha Irmã e professora Valéria Carneiro pelo apoio na escrita da língua portuguesa e pelas correções ortográficas. Minha admiração pelo seu caráter, ética e carinho.

Aos professores e amigos do Núcleo de Estudos de Tecnologias em Geociências (NETGeo) da Universidade Federal de Pelotas Dra. Angélica Cirolini e Dr. Alexandre Bruch, sem os quais a realização deste se tornaria mais árdua. Agradeço por toda paciência, confiança, carinho e amizade. Foi um convívio sempre prazeroso e enriquecedor.

Mede o que é mensurável e torna mensurável o que não o é.”  
(Galileu Galilei)

## RESUMO

O interesse por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT's) tem crescido rapidamente e as aplicações têm se disseminado nas mais diferentes áreas com finalidades diversas. Atualmente, o Brasil e outros países trabalham no desenvolvimento para diferentes mercados, destacando a agricultura, mapeamento urbano e igualmente na área da mineração. Especificamente para a área de cartografia e mapeamento, o aperfeiçoamento dos programas de restituição digital e dos sensores aerotransportados em VANT's, bem como o avanço da própria tecnologia deste tipo de aeronave são os principais motivos do crescimento do uso desta ferramenta na área de topografia e modelagem com aplicações na mineração. As tecnologias empregadas evoluíram consideravelmente, como o caso dos sistemas autônomos, que se tornam cada dia mais confiáveis e sofisticados. O objetivo da presente pesquisa é desenvolver uma metodologia que proporcione agilidade e rapidez durante o levantamento de campo, garantindo precisão aos produtos gerados a partir da restituição de aerofotos digitais capturadas por câmeras embarcadas em VANT's de pequeno porte. A técnica propõe a geração de modelos digitais de elevação (MDEs) capazes de dar suporte ao cálculo de volumes de avanço em cavas de minas sem o auxílio de pontos de controle em solo. A proposta utiliza aeronaves de pequeno porte com a introdução de um dispositivo externo com um receptor de dupla frequência que armazene dados brutos e que, posteriormente, permitirá corrigir com uma base em solo, técnica conhecida com Post Process Kinematic (PPK). Para validar os resultados, foram realizados testes para comprovar a precisão, a acurácia e a não tendenciosidade das discrepâncias posicionais planimétricas e altimétricas, utilizando pontos amostrais coletados em solo através do método relativo estático rápido. A metodologia demonstrou, nas validações de coordenadas e posicionamento dos levantamentos, precisão centimétrica e uma redução significativa no tempo de levantamentos aerofotogramétricos com drones, reduzindo, ou mesmo, eliminando a necessidade de coleta de dados de campo.

**Palavras-chave:** VANT. Drone. Sensoriamento Remoto. Avaliação de impactos ambientais. Geodésia. Topografia. Modelagem 3D. PPK.



## ABSTRACT

The interest in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) has grown quickly and the applications have spread in the most different areas for different purposes. Currently, Brazil and other countries are working on development for different markets, highlighting agriculture, urban mapping and also in the mining area. Specifically for the area of cartography and mapping, the improvement of digital restitution programs and airborne sensors in UAVs, as well as the advance of its own technology of this kind of aircraft are the main reasons for the growth in the use of this tool in the area of topography and modeling with mining applications. The technologies used evolved considerably, like in the case of autonomous systems, which are becoming reliable and sophisticated. The objective of this research is to develop a methodology that ensures agility, speed and precision in products generated from the restitution of digital aerial photos captured by cameras on board of small UAVs. This practice will allow the generation of Digital Terrain Models (DTMs) capable of supporting the calculation of advance volumes in mine pits without the aid of soil control points. The study proposal contemplates the development of a methodology for aerophotogrammetric surveys with small aircrafts with the introduction of an external device with a simple frequency receiver that it stores raw data and that later it allows to correct with a base on soil, a technique known as Post Process Kinematic (PPK). In order to validate the results, tests will be done to prove the precision, accuracy and non-bias of positional planimetric and altimetric discrepancies, using sample points collected on the soil through the fast-static relative method and compound geometric leveling. The methodology in question represents the capture of coordinates and positioning of surveys with a centimeter accuracy and a significant reduction at the time of aerophotogrammetric surveys with Unmanned Aerial Vehicles, reducing or even eliminating the need to collect field data.

**Keywords:** UAV. Remote Sensing. Environmental Impact Assessment. Geodesy. Topography. 3D Modeling. PPK.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de um elipsoide de revolução .....	22
Figura 2 - Forma geoidal representando por um modelo geoidal global .....	23
Figura 3 - Projeção cilíndrica normal ou equatorial .....	25
Figura 4 - Divisão de fusos e zonas .....	26
Figura 5 - O sistema de coordenadas Cartesiano Espacial Geocêntrico. ....	28
Figura 6 - Representação das coordenadas curvilíneas elipsoidais e altura elipsoidal do ponto P. ....	29
Figura 7 - Etapas do PPP-IBGE. ....	35
Figura 8 - Diferença de FOV e IFOV. ....	37
Figura 9 - IFOV. ....	37
Figura 10 - Recobrimentos lateral e longitudinal em um levantamento fotogramétrico. ....	38
Figura 11 - Grade retangular regular. ....	46
Figura 12 - Exemplo de Triangulação de Delaunay. ....	47
Figura 13 - Categoria de VANT .....	51
Figura 14 - Técnica RTK/UHF + armazenamento de dados .....	52
Figura 15 - Ilustração da técnica RTK/GSM. ....	53
Figura 16 - Esquema de montagem do sistema PPK. ....	54
Figura 17 - Modelos de receptores GNSS .....	56
Figura 18 - Modelo de antena GNSS modelo HC771 .....	58
Figura 19 - Fluxograma das etapas processo de desenvolvimento do sistema .....	60
Figura 20 - Mapa de localização da área de estudo. ....	61
Figura 21 - VANT multirotor utilizada na pesquisa .....	62
Figura 22 - Bateria para alimentar o receptor GNSS EMLID Reach M+ .....	64
Figura 23 - Receptor GNSS EMLID Reach M+ .....	64
Figura 24 - Dimensões da antena Tallysman, modelo HC871 .....	65
Figura 25 - Desempenho da antena na detecção do efeito do multicaminho nas medidas de pseudodistância para cinco satélites. ....	66
Figura 26 - Relação sinal/ruído para diferentes satélites .....	67
Figura 27 - Suporte de fixação do receptor e da antena. ....	68
Figura 28 - Sistema fotogramétrico e offset da antena em relação ao ENU. ....	68
Figura 29 - Localização dos PCAs .....	69
Figura 30 - Fluxograma de processamento de dados GNSS .....	70

Figura 31 - Tela do aplicativo RTKLIB RTKCONV .....	71
Figura 32 - Tela do aplicativo RTKLIB RTKCONV – Options .....	72
Figura 33 - Relatório de processamento do ponto de apoio processado no PPP-IBGE .....	72
Figura 34 - Tela do Software RTKPOST .....	73
Figura 35 - Configuração de processamento .....	73
Figura 36 - Inserção do offset da antena e da posição da base.....	74
Figura 37 - (A) Localização dos PCAs , (B) observações coletadas do PCA 3 e (C) observações coletadas do PCA 5. ....	75
Figura 38 - Arquivo processado no RTK .....	76
Figura 39 - Interface do SVT desenvolvido em linguagem de programação Python. ....	77
Figura 40 - Imagem mostrando o alvo virtual centrado, criado de forma automática .....	78
Figura 41 - Alinhamento das imagens.....	79
Figura 42 - Ponto de Controle Aéreo.....	81
Figura 43 - Distribuição dos pontos de checagem na área de estudo.....	87
Figura 45 - Discrepâncias posicionais obtidas do ortomosaico e MDS na planimetria e altimetria dos pontos do MDS utilizando PCAs com altura de 40 metros.....	91
Figura 46 - Boxplot com as discrepâncias posicionais planimétricas e altimétricas. ....	91
Figura 47 - (A) Distribuição planimétrica tendenciosa dos pontos testados. (B) Vetor de direção entre a posição de referência a testada.....	93
Figura 48 - Discrepâncias posicionais obtidas do ortomosaico e MDS na planimetria e altimetria dos pontos do MDS utilizando PCAs com altura de 40 metros.....	96
Figura 49 - Boxplot com as discrepâncias posicionais planimétricas e altimétricas .....	97
Figura 50 - (A) Distribuição planimétrica tendenciosa dos pontos testados. (B) Vetor de direção entre a posição de referência a testada.....	97
Figura 51 - Discrepâncias posicionais obtidas do ortomosaico e MDS na planimetria e altimetria dos pontos do MDS utilizando PCAs com altura de 40 metros.....	101
Figura 52 - Boxplot com as discrepâncias posicionais planimétricas e altimétricas .....	102
Figura 53 - (A) Distribuição planimétrica tendenciosa dos pontos testados. (B) Vetor de direção entre a posição de referência a testada (PCA 80m). ....	103
Figura 54 - Gráfico de diagrama de dispersão altimétrica de 40m .....	105
Figura 55 - Gráfico de diagrama de dispersão altimétrica de 60m .....	105
Figura 56 - Gráfico de diagrama de dispersão altimétrica de 80m .....	106
Figure 57: Gráfico de diagrama de dispersão planimétrica de 40m .....	107

Figure 58 - Gráfico de diagrama de dispersão planimétrica de 60m .....	107
Figure 59 - Gráfico de diagrama de dispersão planimétrica de 80m .....	107

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação segundo os desvios-padrão .....	21
Tabela 2 - PEC-PCD Planimétrico .....	42
Tabela 3 - PEC-PCD para os Modelos Digitais de Terreno (MDT), de Elevação (MDE) e de Superfície (MDS).....	43
Tabela 4 - Vantagens e desvantagens entre os modelos de VANT's .....	51
Tabela 5 - Modelos de VANT's que possuem embarcados de fábrica o RTK/PPK...55	
Tabela 6 - Modelos de kits PPKs comercializados no Brasil e no mundo .....	55
Tabela 7 - Modelos de receptores passíveis de serem embarcados em VANT's .....	56
Tabela 8 - Modelos de antenas passíveis de serem embarcados em VANT's.....	57
Tabela 9 - Diferenças entre os métodos de levantamento, considerando a tecnologia .....	59
Tabela 10 - Características do VANT e do plano de voo utilizado no aerolevante.....	63
Tabela 11 - Bibliotecas utilizadas no software SVT.....	76
Tabela 12 - Valores de tolerância para avaliação da acurácia posicional planialtimétrica segundo o Decreto-lei nº 89.817 .....	84
Tabela 13 - Coordenadas dos pontos de checagem (R).....	86
Tabela 14 - Coordenadas dos pontos (T) do MDS utilizando PCAs com altura de 40 metros .....	89
Tabela 15 - Discrepâncias dos pontos do MDS utilizando PCAs com altura de 40 metros .....	89
Tabela 16 - PEC-PCD para produtos cartográficos classe A .....	90
Tabela 17 - Resultado do teste t de Student e enquadramento .....	92
Tabela 18 - Resultado do teste Qui-quadrado e enquadramento.....	93
Tabela 19 - Enquadramento dos resultados do EQM .....	94
Tabela 20 - Coordenadas dos pontos (T) do MDS utilizando PCAs com altura de 60 metros .....	94
Tabela 21 - Discrepâncias dos pontos do MDS utilizando PCAs com altura de 60 metros .....	94
Tabela 22 - PEC-PCD para produto cartográficos classe A.....	95
Tabela 23 - Resultado do teste t de Student e enquadramento .....	97
Tabela 24 - Resultado do teste Qui-quadrado e enquadramento.....	98

Tabela 25 - Enquadramento dos resultados do EQM .....	98
Tabela 26 - Coordenadas dos pontos (T) do MDS utilizando PCAs com altura de 60 metros .....	99
Tabela 27 - Discrepâncias dos pontos do MDS utilizando PCAs com altura de 40 metros .....	100
Tabela 28 - PEC-PCD para produtos cartográficos classe A .....	101
Tabela 29 - Resultado do teste t de Student e enquadramento (PCA 80m) .....	102
Tabela 30 - Resultado do teste Qui-quadrado e enquadramento (PCA 80m) .....	103
Tabela 31 - Enquadramento dos resultados do EQM (PCA 80m).....	104

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANAC	Agência Nacional da Aviação Civil
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
CAVE	Certificado de Autorização de Voo Experimental
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
CONCAR	Comissão Nacional de Cartografia
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
DOG	<i>Difference of Gaussian</i>
DTM	<i>Digital Terrain Model</i>
ECEF	<i>Earth Centered/Earth Fixed</i>
EMQ	Erro Médio Quadrático
FOV	<i>Field Of View</i>
GLONNAS	<i>Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GRS80	<i>Geodetic Reference System 1980</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
IFOV	<i>Instantaneous Field Of View</i>
IMU	Unidade de Medição Inercial
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INDE	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISO	International Standards Organization
Lat	Latitude
Long	Longitude
MDS	Modelo Digital de Superfície
MNS	Modelo Numérico de Superfície
MDT	Modelo Digital do Terreno
MTOM	Massa Máxima de Decolagem
NBR	Norma Brasileira

NOTAM	<i>Notice to Airmen</i>
PTL	Plano Topográfico Local
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format (Formato de Intercâmbio Independente de Receptor)</i>
RLS	Regressão Linear Simples
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RPAS	<i>Remotely Piloted Aircraft System</i>
RPA	<i>Remotely Piloted Aircraft</i>
SAD69	<i>South American Datum 1969</i>
SAL	Sistema Astronômico Local
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIFT	<i>Scale Invariant Feature Transform</i>
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico das Américas
SGL	Sistema Geodésico Local
STL	Sistema Topográfico Local
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle/Unmanned Airbone Vehicle</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
NSSDA	<i>National Standard for Spatial Data Accuracy</i>



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1 Apresentação .....	17
1.2 Justificativa.....	18
1.3 Meta.....	19
1.4 Objetivos Específicos .....	19
<b>CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>19</b>
2.1 Topografias convencionais .....	19
2.2. Superfícies de referência da terra .....	21
2.2.1 Modelo elipsoidal biaxial de revolução.....	21
2.2.2 Modelo Geoidal .....	23
2.2.3 Modelo plano.....	24
2.3 Sistema de projeção .....	24
2.3.1 Projeção de Universal Transversa de Mercator (UTM) .....	25
2.3.2 Plano Topográfico Local .....	27
2.4 Sistemas de coordenadas .....	27
2.4.1 Sistema de coordenadas cartesianas elipsoidais .....	28
2.4.2 Sistema de coordenadas geodésicas (ou curvilíneas) .....	28
2.5 Sistema Geodésico de Referência.....	29
2.6 Métodos de Posicionamento por GNSS .....	30
2.7 Aerofotogrametria .....	36
2.7.1 Fotogrametria Digital .....	39
2.7.2 Pontos de apoio Aerofotogramétrico.....	39
2.7.3 Fases do processo de produção fotogramétrica .....	40
2.7.4 Resolução espacial do pixel no terreno e a escala do mapa .....	40
2.7.5 Modelo Digital de Terreno (MDT).....	44
2.7.6 Estruturação dos dados em uma malha regular .....	45
2.7.7 Estruturação dos dados em uma rede triangular.....	46
2.7.8 Modelagem da superfície.....	47
2.8 Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) .....	48
2.8.1 Categorias de VANT .....	50
2.8.2 Método de correção .....	51
2.8.3 Sistema PPK .....	54

2.8.4	Receptores GNSS .....	55
2.8.5	Antenas GNSS .....	57
<b>CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA .....</b>		<b>59</b>
3.1	Local do experimento .....	61
3.2	Veículo aéreo não tripulado.....	62
3.3	Receptor GNSS, Antena e Suporte.....	63
3.4	Procedimento de coleta de dados em campo .....	68
3.5	Processamento de dados GNSS .....	70
3.6	Exportação de dados processados.....	75
3.7	Software Virtual Target (SVT).....	76
3.8	Processamento fotogramétrico .....	78
3.9	Avaliação da acurácia posicional .....	82
<b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>		<b>85</b>
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>		<b>108</b>
5.1	Recomendações e desenvolvimentos futuros .....	110
<b>REFERÊNCIAS.....</b>		<b>111</b>
<b>ANEXO I.....</b>		<b>117</b>

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E APRESENTAÇÃO

### 1.1 Apresentação

O uso das geotecnologias está disseminado em diversas áreas do conhecimento, atuando em conjunto com ferramentas e técnicas, como Sensoriamento Remoto, Sistema de Informação Geográfica (SIG), Processamento Digital de Imagens (PDI), Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT's) e no uso de *Global Navigation Satellite System* - GNSS (BARCELOS, 2017). O uso desses equipamentos e plataformas se difundiu rapidamente ao longo da última década na mineração, possibilitando maior eficiência e produtividade nos levantamentos, redução de exposição aos riscos inerentes à operação, além de fiscalizações e controles mais frequentes, permitindo aos órgãos governamentais uma melhor gestão legal e ambiental (RIBEIRO JÚNIOR, 2011).

Continuamente, novos modelos de VANT's e os dispositivos neles embarcados vêm sendo aprimorados pelos fabricantes, por exemplo, seus sensores e estabilizadores, assegurando maior precisão em posicionamento e qualidade do produto gerado. Em contrapartida, a metodologia que garanta precisão posicional utilizada em campo continua a mesma, tornando o aerolevante moroso ou mesmo inviável, dependendo das circunstâncias. Aspectos como eventuais obstáculos no terreno, dificuldades de acesso, adensamento vegetal, entre outros, dificultam a aquisição de pontos de controle em solo ou mesmo o próprio levantamento das áreas a serem mapeadas (NETO, 2017).

Os processos de retificações das imagens que conduzem à obtenção de produtos de sensoriamento remoto (com precisão posicional e isento de distorções) exigem alguns procedimentos de campo, especialmente a coleta de dados em solo através de alvos foto-identificáveis naturais ou artificiais. A implantação desses alvos deve ser em quantidade suficiente para a adequada cobertura da área além de representativa do relevo, bem como de fácil e precisa identificação nas imagens no momento do registro no software de processamento (SANTOS *et al.*, 2011). Essas tarefas nem sempre são triviais e tornam o processo mais lento e dificultoso do ponto de vista operacional, além do inevitável aumento do custo, especialmente devido à necessidade de pessoal, tempo de distribuição, coleta de coordenadas e equipamentos adequados.

Uma alternativa para dispensar o uso de alvos nesses trabalhos é a obtenção das coordenadas do sensor com precisão compatível com as necessidades do processo de restituição no momento exato da obtenção de cada imagem/foto. Alguns fabricantes produziram seus próprios dispositivos que garantem o disparo da câmera sincronizado com o registro da posição da aeronave, utilizando métodos relativos, obtendo posições em tempo real e a telemetria como *Real Time Kinematic (RTK)*, ou pós processados, *Post Process Kinematic (PPK)*. Ambos os métodos garantem precisões milimétricas tanto horizontal como vertical.

Considerando que as soluções comerciais disponíveis possuem custo elevado e muitas vezes não correspondem à precisão demandada por determinadas aplicações, o estudo visa contribuir ao conhecimento cartográfico das atividades ligadas à áreas em processo de lavra em minerações à céu aberto, proporcionando redução de custos e riscos da obtenção direta de pontos de controle. Isso foi possível com o uso de soluções GNSS (receptores) que utiliza as observações da fase da onda da portadora, integrada com uma metodologia que parte da coleta de dados em campo passando pelo processamento das imagens até a geração dos produtos do processamento.

## 1.2 Justificativa

Os estudos para desenvolvimento de veículos aéreos autônomos se intensificaram há mais de uma década nos diferentes centros do mundo, buscando melhorias, especialmente no quesito autonomia de voo e resolução dos sensores embarcados. A procura por equipamentos que apresentam versatilidade, portabilidade, simplicidade e baixo custo é a preferência do usuário, principalmente, para os prestadores de serviços. Estes fatores são decisivos na hora da aquisição que buscam atender esse segmento de mercado como profissionais, empresas ou órgãos governamentais que utilizam VANT's para diferentes finalidades em especial, multirotores de pequeno porte, onde seja inviável a distribuição de pontos de controle ou, até mesmo, áreas de risco ou difícil acesso, no caso de perícias, sem deixar de perder precisão é necessário algo diferenciado. De forma paralela, apresenta-se a possibilidade de agilizar o tempo de levantamento e permitir a redução de custos e a manutenção da qualidade na geração de produtos.

### 1.3 Meta

Esta tese tem como meta desenvolver uma metodologia para realizar a coleta e o processamento de imagens capturadas por VANT sem uso de pontos de controle em solo, utilizando um sistema inovador de baixo custo, que possua precisão posicional equivalente aos levantamentos convencionais utilizando o método relativo cinemático.

### 1.4 Objetivos Específicos

Para atingir a meta proposta por este trabalho, os seguintes objetivos foram trabalhados para avançar durante o estudo:

I. Analisar as potenciais soluções de baixo custo para a determinação das posições geodésicas do sensor aerotransportado em VANT, desenvolvendo e adaptando um dispositivo de fácil instalação;

II. Desenvolver um aplicativo para dispositivos móveis que crie automaticamente alvos no centro de cada imagem capturada para utilização como pontos de controle artificiais;

III. Analisar os limites de aplicabilidade do método em diferentes configurações de voos nas tomadas de imagens que serão utilizadas como controle;

IV. Avaliar a qualidade do produto digital perante o Sistema Cartográfico Nacional (SCN) e, conseqüentemente, para a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE) e verificar o enquadramento dos produtos ao Padrão de Exatidão Cartográfica – Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) do Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984.

## **CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE**

### 2.1 Topografias convencionais

Topografia, que traduzido semanticamente do grego, significa a “descrição de um lugar ou região” (topos, que significa “lugar” ou “região”, e grapho, que significa “descrever”). É uma ciência que estuda todas as características presentes na superfície de um território. Elas são chamadas de “acidentes geográficos” ou “forma de relevo”, sejam estas características feições naturais como, rios, lagos, colinas, montanhas, ou mesmo feições artificiais como, estradas, edificações, corpos de drenagem (SILVA, 2015).

A topografia também está relacionada à cartografia, que realiza o estudo dos mapas e a combinação destes conhecimentos que contribuem para a especificação das condições estruturais de uma área, sendo descritas graficamente por meio de cartas topográficas e mapas. O levantamento topográfico só é aplicável para a análise de pequenas áreas, pois é difícil representar a Terra em um plano, considerando que a superfície da Terra é irregular com um formato chamado de geoide. Por esse motivo, a realização da topografia é direcionada para áreas relativamente pequenas, pois assim é possível reduzir o erro causado pela curvatura da superfície terrestre, sem haver perdas de precisão durante o levantamento topográfico (FERREIRA, 2017). Quando se trata de analisar e medir superfícies maiores, utiliza-se o termo geodésia, e o levantamento geodésico se utiliza de parte dos equipamentos e conceitos da topografia, porém tais análises levam em conta a curvatura da Terra e seu formato irregular, pois quanto maior a área levantada, maiores serão as deformações das representações.

Durante a evolução dos processos de levantamentos topográficos, os métodos diretos que utilizavam trenas de aço foram substituídos por métodos indiretos, surgindo os goniômetros, que são mais utilizados nas operações de campo, como as bússolas, os trânsitos, os teodolitos, os taqueômetros e os esquadros. A modernização dos instrumentos ocorreu com surgimento e evolução da microeletrônica e da informática, onde os sistemas eletrônicos e automáticos passaram a substituir os sistemas mecânicos e procedimentos manuais.

A primeira grande inovação ocorreu em 1943, com o surgimento do primeiro medidor eletrônico de distância (MED) ou simplesmente denominado distanciômetro eletrônico. O Sueco E. Bergstrand, foi o responsável pelo desenvolvimento, tornando-o conhecido pela marca comercial *Geodimeter* NASM-2, disponibilizado no mercado em 1950.

Porém, com os avanços tecnológicos, foi permitida realizar a substituição destes equipamentos por instrumentos mais avançados, que se utilizam das tecnologias de computação e processamento de dados. Surge então a estação total, uma fusão do distanciômetro com um teodolito digital, capaz de realizar a medição de ângulos e distâncias, armazenando estes dados e, ao mesmo tempo, realizando cálculos matemáticos trigonométricos, anteriormente realizados manualmente por meio de tabelas, para a definição das coordenadas (X, Y, Z) de cada ponto levantado. Os instrumentos são classificados em três classes, conforme a sua precisão angular e linear. As estações totais são classificadas segundo os desvios-padrão que as caracterizam, de acordo com a Tabela 1 da NBR 13.133 (ABNT, 2021 - Execução de Levantamentos Topográficos) da seguinte forma:

Tabela 1 - Classificação segundo os desvios-padrão

Classe	Desvio-padrão da direção	Desvio-padrão linear
1	$\sigma \leq 02''$	$\pm (1\text{mm} + 1 \times 10^{-6})$
2	$02'' < \sigma \leq 05''$	$\pm (2\text{mm} + 2 \times 10^{-6})$
3	$05'' < \sigma \leq 10''$	$\pm (3\text{mm} + 3 \times 10^{-6})$

Fonte: ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2021. NBR13.133 - Execução de levantamentos topográficos.

## 2.2. Superfícies de referência da terra

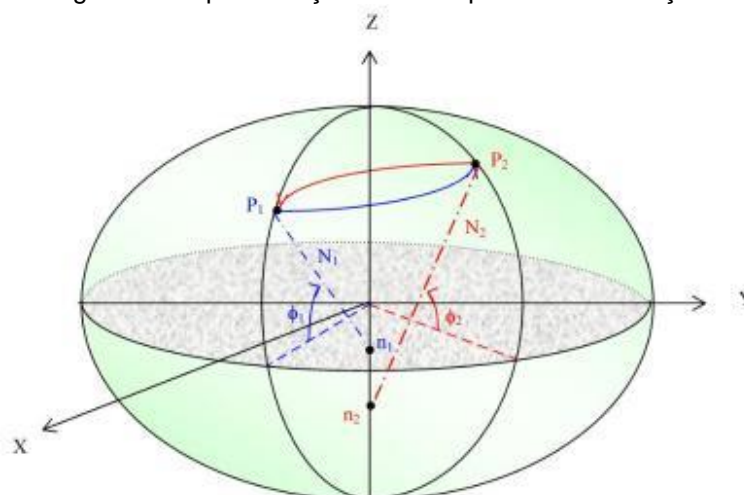
A forma real da Terra não é um sólido, ou seja, existem irregularidades da superfície do terreno (relevo), formadas pelas cadeias de montanhas, campos, fossas oceânicas e pântanos, o que dificulta a sua representação. Os resultados desses efeitos são mostrados planimetricamente por sistemas de (adotada oficialmente no Sistema Geodésico Brasileiro) e altimetricamente no formato de altitudes ortométricas ou geométricas. Os tópicos a seguir mostram uma breve descrição conceitual dessas duas formas de representação geodésica da posição de pontos sobre a Terra.

### 2.2.1 Modelo elipsoidal biaxial de revolução

É o modelo matemático mais usual em Geodésia para representar a Terra. Ele é formado pela rotação de uma elipse em torno de seu eixo menor, o que lhe confere o formato achatado nos polos. Sobre esse modelo, são realizados os cálculos geodésicos e definidos sistemas de coordenadas elipsoidais cartesianas e curvilíneas

que permitem o perfeito posicionamento matemático sobre este modelo, independentemente do método de posicionamento utilizado (Figura 1).

Figura 1 - Representação de um elipsoide de revolução



Fonte: Adaptada de Silva, 2015.

As expressões a seguir mostram o cálculo do achatamento ( $f$ ), da primeira excentricidade ( $e$ ) e da segunda excentricidade ( $e'$ ) a partir da definição do semieixo maior ( $a$ ) e do semieixo menor ( $b$ ) do elipsoide (ZANETTI, 2006), segundo as equações 1, 2 e 3.

$$f = \frac{(a - b)}{a} \tag{1}$$

$$e = \frac{\sqrt{(a^2 - b^2)}}{a} \tag{2}$$

$$e' = \frac{\sqrt{(a^2 - b^2)}}{b} \tag{3}$$



O Sistema Geodésico Brasileiro adota o Sistema Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), cujo valor do semieixo maior ( $a$ ) é 6.378.137 metros e o valor do achatamento ( $f$ ) é de  $1/298,257222101$ .

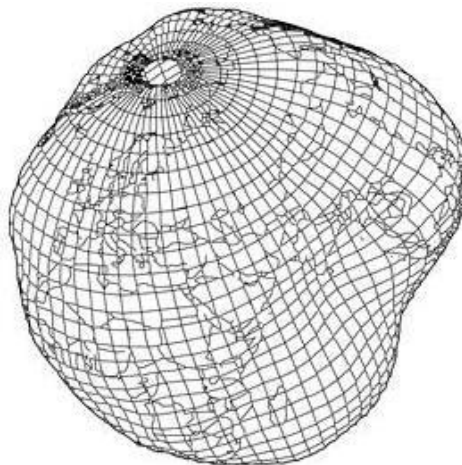
### **2.2.2 Modelo Geoidal**

O geoide corresponde a uma superfície equipotencial de gravimetria coincidente com o nível médio não perturbado dos mares, prolongado através dos continentes. A variação da distribuição e das massas na Terra, bem como a rotação da Terra fazem com que o geoide tenha uma forma irregular (Figura 2). Isto causa variação na direção da vertical (perpendicular ao geoide, fornecida pelo nível de bolha e base do nivelamento dos equipamentos geodésicos) de ponto para ponto (ANDRADE, 2008).

É por este motivo que o elipsoide é mais adequado para posicionamentos planimétricos. O geoide tem a sua maior importância nos trabalhos de altimetria, especialmente nas grandes obras de engenharia, pois é segundo o geoide que os fluidos (como água, por exemplo) se movimentam sobre a Terra.

As diferenças angulares entre a vertical e a normal são chamadas de “desvios da vertical” e podem ser usadas para calcular a distância entre o geoide e o elipsoide, chamada de “ondulação geoidal”. Com ele, podemos obter a altitude ortométrica de pontos em que se conheça a altitude elipsoidal fornecida, por exemplo, por GNSS. A ondulação geoidal pode ser obtida por modelos do geopotencial. O Sistema Geodésico Brasileiro utiliza o modelo do geopotencial chamado “Mapgeo 2015”, desenvolvido pelo IBGE e disponibilizado gratuitamente. É dessa forma que foram obtidas as altitudes ortométricas utilizadas nesta pesquisa.

Figura 2 - Forma geoidal representando por um modelo geoidal global



Fonte: Adaptada de Irineu da Silva 2015.

### 2.2.3 Modelo plano

Na Topografia e Cartografia, quando um mapa é desenhado, se está fazendo um recorte de uma porção dessa superfície, o que permite fazer a representação cartográfica em papel ou em um arquivo digital, ou seja, numa superfície plana. Dessa forma, tem-se o mundo real reduzido a pontos, linhas e áreas representadas por uma variedade de recursos visuais, tais como tamanho, textura ou padrão, cor, orientação e, principalmente, a forma, definida pela sua projeção. O grande problema da Cartografia consiste em transformar uma superfície esférica num plano, para que possa ser representado em documentos cartográficos, pois, como sabemos, a esfera é um sólido não-desenvolvível, isto é, não-achatável ou não planificável. Segundo MONICO (2008), quando se deseja representar a superfície da Terra, diversas formas podem ser utilizadas: mapas, cartas, plantas, modelos reduzidos, modelos numéricos, globos e outros.

### 2.3 Sistema de projeção

Cartografia é a parte da Geodésia que trata da representação plana do modelo de referência (tridimensional). Os sistemas de projeções cartográficas foram desenvolvidos para dar uma solução a esse problema da transferência de uma imagem da superfície curva da terra terrestre para um plano, o que sempre vai acarretar deformações. Os sistemas de projeções constituem-se de uma fórmula matemática que transforma as coordenadas geodésicas, a partir de uma superfície elipsoidal, em coordenadas planas, mantendo correspondência entre elas. O uso

desse artifício geométrico das projeções consegue reduzir as deformações, mas nunca as eliminar.

Conforme Silva C. A. (2015), as cartas topográficas são representações planas da superfície terrestre. As mesmas são obtidas a partir do uso de um sistema de projeção cartográfica, estabelecendo uma relação pontual e unívoca entre as superfícies de referência e de representação.

A superfície de referência é representada por um sistema de coordenadas geodésicas tridimensionais curvilíneas ( $\varphi$ ,  $\lambda$ ,  $h$ ) ou cartesianas ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) e a superfície plana é definida por um sistema de coordenadas plano retangulares ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ).

### **2.3.1 Projeção de Universal Transversa de Mercator (UTM)**

Idealizada no século XVI, a projeção cilíndrica de Mercator se tornou a preferida dos navegadores por ser a única em que as direções podiam ser traçadas em linha reta sobre o mapa. Nessa projeção, os paralelos e os meridianos são linhas retas que se cruzam formando ângulos retos. Pertence ao tipo chamado conforme, porque não deforma os ângulos. Em compensação, as áreas extensas ou situadas em latitudes elevadas aparecem nos mapas com dimensões exageradamente ampliadas. A projeção UTM é uma projeção que pode ser visualizada como um cilindro secante à superfície de referência, orientado de forma que o seu eixo esteja no plano do Equador (Figura 3). Por ser um cilindro secante, ele apresenta um diâmetro menor que o da superfície de referência, possuindo assim duas linhas de interseção entre o cilindro e a superfície de referência.

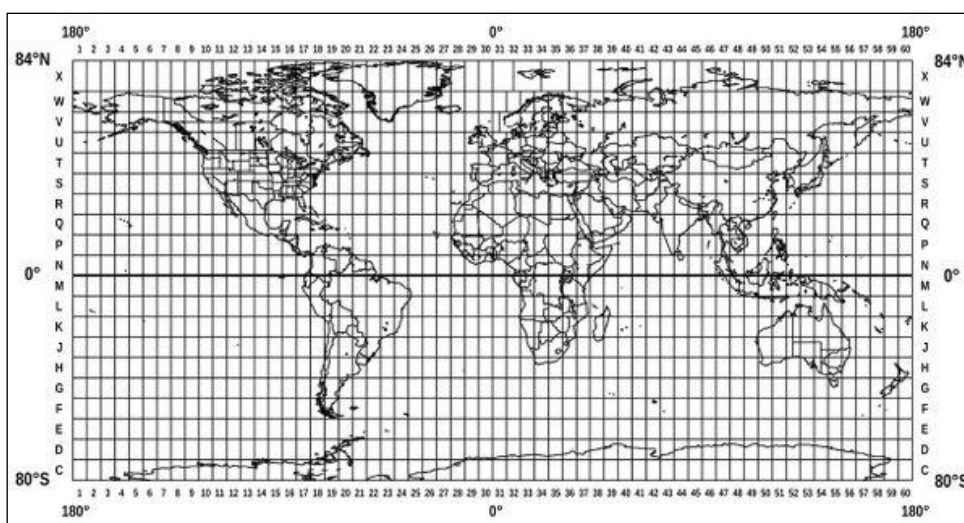
Figura 3 - Projeção cilíndrica normal ou equatorial



Fonte: Adaptada de Silva, 2015.

Para controlar as deformações, a área de projeção da superfície sobre o cilindro é limitada a 6 graus de amplitude, gerando várias áreas chamadas de fusos (Figura 4). A representação gráfica da projeção UTM é realizada sobre um sistema de coordenadas retangulares planas, cuja abcissa é denominada Este e é representada pela letra E, e sua ordenada denominada Norte, representada pela letra N.

Figura 4 - Divisão de fusos ou zonas



Fonte: Adaptada de Silva, 2015.

Características da projeção UTM:

- ✓ Amplitude dos fusos: 6°;

- ✓ Latitude da origem 0°: (Equador);
- ✓ Longitude da origem: Longitude do meridiano central do fuso;
- ✓ Falso Norte: 10.000.000 metros (Hemisfério Sul);
- ✓ Falso Este: 500.000 metros;
- ✓ Fator de escala no meridiano central: 0.9996 (redução);
- ✓ Numeração dos fusos: 1 a 60, a partir do antemeridiano de Greenwich para leste.
- ✓ Limites de aplicação das latitudes: 84°N e 80°S.

### 2.3.2 Plano Topográfico Local

O objetivo principal da topografia é efetuar o levantamento através da execução de medições de ângulos, distâncias e de diferentes níveis, que permitam representar uma porção limitada da superfície terrestre em uma escala gráfica adequada e geralmente grande. As operações efetuadas em campo, com o objetivo de coletar dados para posterior representação, denominam-se levantamento topográfico.

De acordo com a NBR 13133 (ABNT, 2021), despreza-se a influência dos erros sistemáticos devidos à curvatura e ao desvio da vertical. Este plano é perpendicular à vertical no ponto da superfície origem do levantamento, podendo também ser perpendicular à normal. Pode-se realizar o transporte de coordenadas geodésicas sobre o elipsoide também usando medidas angulares e lineares. Neste caso o levantamento será geodésico.

Na Topografia, trabalha-se com medidas lineares e angulares, realizadas sobre a superfície da Terra e a partir destas medidas calculam-se coordenadas, áreas e volumes. O levantamento topográfico georreferenciado é um plano local, uma vez que as coordenadas “UTM” obtidas não se originaram de transformação a partir de suas correspondentes coordenadas geodésicas, mas sim por cálculo direto sobre o plano cartesiano originado na restituição.

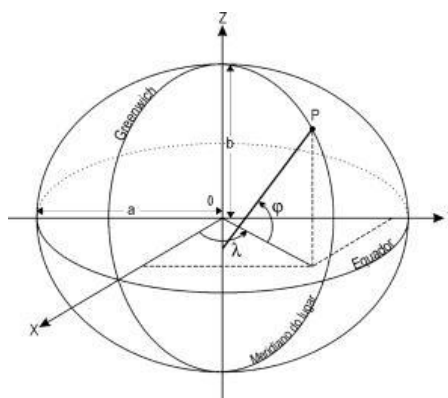
### 2.4 Sistemas de coordenadas

Determinar a posição de um ponto significa determinar as suas coordenadas. E calcular as coordenadas de um ponto significa estabelecer a sua posição em relação a um sistema de projeção de coordenadas e a uma superfície de referência.

### 2.4.1 Sistema de coordenadas cartesianas elipsoidais

Este tipo de sistema de coordenadas é definido de maneira que sua origem seja o centro da Terra (geocêntrico). Os eixos (X,Y) pertencem ao plano do Equador, o eixo (Z) coincide com o eixo médio de rotação da Terra e o eixo (X) é direcionado de maneira a interceptar um meridiano adotado como referência (*Greenwich*) (Figura 5). Segundo Azambuja (2015), todos que utilizam o GNSS o fazem em relação ao sistema de coordenadas geocêntrico definido pela Agência de Defesa e Mapeamento dos Estados Unidos (DMA), chamado de ECEF (Earth-Centered/Earth-Fixed).

Figura 5 - O sistema de coordenadas Cartesiano Espacial Geocêntrico.



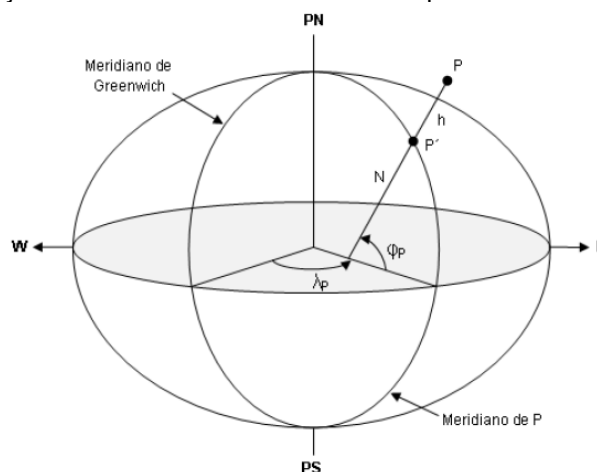
Fonte: Adaptada de Silva, 2015.

### 2.4.2 Sistema de coordenadas geodésicas (ou curvilíneas)

O sistema de coordenadas curvilíneas representa a posição dos pontos no espaço através da latitude ( $\varphi$ ), da longitude ( $\lambda$ ) e da altitude elipsoidal ( $h$ ), quando adotado o elipsóide como superfície de referência (Figura 6).

A latitude geodésica de um ponto é o ângulo formado entre a normal (N) que passa pelo ponto e o plano equatorial, com valores de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , Norte (+) ou Sul (-). A longitude geodésica é o ângulo formado no plano equatorial entre o meridiano convencional de Greenwich e o meridiano que passa pelo ponto considerado, com valores de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , Leste (+) ou Oeste (-).

Figura 6 - Representação das coordenadas curvilíneas elipsoidais e altura elipsoidal do ponto P.



Fonte: Adaptada de Zannetti, 2006.

## 2.5 Sistema Geodésico de Referência

Sistema Geodésico de Referência é formado por um conjunto de parâmetros que definem a forma e as dimensões da Terra, utilizados em um modelo adotado por determinada instituição ou país. Alguns exemplos desses parâmetros são o elipsoide e sua geometria, a velocidade de rotação, a constante gravitacional e o fator dinâmico de forma  $J_2$ . Um sistema geodésico é materializado por um conjunto de pontos geodésicos implantados na superfície terrestre descritores dessa superfície na Terra como um todo ou em uma determinada região de interesse.

Silva (2015) destaca suas finalidades, que vão desde o atendimento a projetos científicos, amarrações e controle de trabalhos geodésicos até o apoio aos levantamentos topográficos.

Atualmente, o Sistema Geodésico do Brasil adota o Sistema Internacional de Referência Geodésico para as Américas (SIRGAS 2000). Segue abaixo características do sistema Geodésico Brasileiro:

I. Referência (“amarração”) geodésica global: *Internacional Terrestrial Reference System (ITRS)* materializado pelo *Internacional Terrestrial Reference Frame (ITRF)*;

II. Figura geométrica para a Terra: Elipsóide do Sistema Geodésico de Referência de 1980 (*Geodetic Reference System 1980 – GRS80*);

III. Datum vertical: Imbituba (SC);

IV. Origem do sistema: Centro de massa da Terra;

V. Orientação: Polos e meridianos de referência consistentes em  $\pm 0,005''$  com as direções definidas pelo BIH (Bureau International de Heure) em 1984,0;

VI. Época de referência das coordenadas: 2000,4.

## 2.6 Métodos de Posicionamento por GNSS

A expressão *Global Navigation Satellite System* – GNSS foi criada em 1991 na *10th Air Navigation Conference*, sob os auspícios da ICAO (*International Civil Aviation Organization*), uma agência especializada da ONU (Organização das Nações Unidas). Esta entidade já previa, naquela época, que a navegação do século 21 teria por base sistemas integrados de navegação por satélite artificiais globais, e não somente o então bem consolidado e conhecido sistema norte-americano *Global Positioning System* (GPS). A este sistema integrado foi dada a denominação *Global Navigation Satellite System* (GNSS) (HEIN,2000). Compõem atualmente o GNSS o sistema russo GLONASS (*Global'Naya Navigatssionaya Sputnikowaya Sistema*, como denominado na Rússia), o sistema chinês Compass ou BeiDou-2 (inicialmente chamado Sistema Experimental de Navegação por Satélite BeiDou-1) e o sistema europeu Galileo (o único com controle totalmente civil).

Segundo Farret (2000), a tecnologia GNSS permite a determinação precisa de um ponto, através da medição da distância desse ponto até um conjunto de, pelo menos, quatro satélites. Essas distâncias são determinadas através da medida do tempo de “viagem” que sinais levam desde a transmissão pelos satélites até a sua chegada ao receptor. Estes sinais (cujas frequências estão dentro do espectro das ondas de rádio) são modulados em ondas portadoras geradas por relógios atômicos de alta precisão.

Nos sistemas GPS e GLONASS as ondas portadoras são geradas a partir de uma frequência fundamental, estando dentro das chamadas frequências L1 (1500 Mhz) e L2 (1200 Mhz). Cada um desses sistemas emprega um modo diferente de discriminação (identificação) destes sinais. O GPS utiliza o *Code Division Multiple Access* (CDMA) cuja frequência é a mesma para todos os satélites e a discriminação entre satélites é feita por um código específico para cada um. O GLONASS utiliza o *Frequency Division Multiple Access* (FDMA) cuja frequência é diferente para cada satélite, o que permite a discriminação entre os satélites, embora também exista neste modo o auxílio de códigos discriminadores (LEANDRO; RODRIGO F., 2011).



Segundo FARRET (2000), em ambos os sistemas, o sinal da portadora L1 é modulado com dois códigos, ou seja, o código P (*precise*), de uso militar, e o código C/A (*coarse-acquisition*), transmitido em código aberto. A portadora L2 é modulada apenas com o código P. A modulação desses códigos na respectiva frequência padrão permite a medida do citado tempo de “viagem” do sinal e a consequente determinação da distância receptor-satélite. Além disso, permite a transmissão de dados com informações fundamentais para a determinação da posição do receptor em Terra, como as efemérides dos satélites e os coeficientes dos modelos de correção dos erros de relógios dos satélites. Essa determinação da chamada “distância por código” é ruidosa ao nível de metro, o que se propaga para as coordenadas estimadas para as coordenadas do receptor.

Importante destacar que a distância receptor-satélite também pode ser determinada de forma menos ruidosa (ao nível do cm ou melhor) através da medida da fase das ondas portadoras (que é ambígua) juntamente com a determinação do número de ciclos inteiros da frequência portadora que completam a medida da fase até o satélite e que é conhecido por “ambiguidades inteiras”. A soma da fase medida com as ambiguidades inteiras fornece o número de ciclos da portadora do receptor até o satélite o qual, multiplicado pelo comprimento de onda, fornece a chamada “distância por fase” do receptor até o satélite, a qual é não ambígua. Essa determinação, embora menos ruidosa, é bem mais difícil de ser conseguida do que a distância por código.

De qualquer forma, os valores das distâncias assim determinadas entram na composição do sistema de equações que irá estimar as coordenadas do receptor GNSS com maior ou menor ruído (qualidade).

### **2.6.1 Receptores GNSS**

Os receptores GNSS são classificados segundo diferentes critérios. Alguns deles são levados em conta por Seeber (2003). Uma classificação tecnicamente adequada proposta por esse autor é a que se baseiam exatamente nos sinais e suas técnicas implementadas no receptor, como visto acima. Segundo esta classificação, há três tipos de receptores:

A - Código C/A;

- B - Código C/A mais fase da portadora L1;
- C - Código C/A mais código da portadora L1 mais código da portadora L2;
- D - Código C/A mais código P mais as fases das portadoras L1 e L2.

O rigor técnico desta classificação permite a projeção da qualidade possível de ser alcançada pelo receptor segundo à sua tecnologia interna (*firmware*) ou a eles agregando tecnologias acessórias, como algoritmo de processamento, tecnologia de comunicação base-móvel, e outros.

Seeber (2003) cita que classificações ao nível da comunidade usuária (de menor rigor técnico-científico) também são possíveis, como, por exemplo: receptores militares, civis, geodésicos, de navegação e outros. Salienta-se, no entanto, que essa classificação pode se tornar um tanto frágil na medida em que permite cruzamentos de critérios que prejudicam a unicidade da classificação, como visto acima. Por exemplo, considerando-se como “geodésico” um receptor classificado acima como do tipo D (esperando dele uma precisão centimétrica), ele poderá se comportar como receptor de navegação (do qual se aceita uma precisão ao nível de metro) se não sofrer qualquer correção diferencial. O inverso pode ser dito do receptor de navegação se suas observações puderem ser aproveitadas para uma correção diferencial e isso, tanto em tempo real quanto em pós-processamento.

Segundo Farret (2007), é comum a comunidade usuária, particularmente no Brasil, associar aos receptores GNSS às classificações ditas “navegação” aos receptores do tipo A; “topográficos” aos receptores do tipo B; e “geodésicos” aos receptores do tipo C e/ou D. Salienta-se, no entanto, que a qualidade possível a partir deles está na dependência de fatores externos auxiliares, como antes mostrado e exemplificado a seguir.

Assim, a utilização de receptores GNSS classificados como geodésicos, conforme citado e definido, pode resultar em produtos precisos para determinadas finalidades, desde que sofram, por exemplo, correção diferencial. Esta correção tanto pode ser em pós-processamento em programa dedicado (chamado posicionamento diferencial/relativo pós-processado) ou em tempo real através de “link” de comunicação base-móvel (chamado posicionamento diferencial/relativo em tempo real e conhecido pelas siglas DGPS ou RTK, de *Real Time Kinematic*, caso a solução da distância receptor-satélite se baseie em código ou fase, respectivamente, como explicado anteriormente).

Ainda segundo Farret (2007), independentemente dos fatores citados, a abundância de tempo de ocupação do ponto em um levantamento GNSS é fator preponderante e decisivo para obtenção de alta precisão. Desta forma, classificações com pouco amparo técnico-científico como, por exemplo, levantamentos “estático” e “estático-rápido” com base apenas no tempo de ocupação (como presente no Manual Técnico de Posicionamento para Georreferenciamento de Imóveis Rurais – INCRA, 2013) não fazem sentido e devem ser evitadas.

### **2.6.2 Tipos de posicionamento**

O tipo de receptor e a forma como são utilizados, como visto anteriormente, naturalmente conduzem à classificação dos chamados Métodos de Posicionamento GNSS. Mostram-se a seguir dois desses métodos, ou seja, os de maior interesse em relação à presente pesquisa.

### **2.6.3 Posicionamento por Ponto Preciso – PPP**

O Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) é um método que não se vale de correções diferenciais/relativas para fontes de erros como relógios, efemérides e atmosfera (ionosfera e troposfera), gerados em estações de referência. No PPP são usados valores para essas fontes de erros já corrigidos diretamente antes de entrarem no processo estimativo.

Arquivos com correções para órbitas (efemérides), relógios, *frame* de referência e atmosfera podem ser obtidos do *International GNSS Service* – IGS, em [www.igs.org](http://www.igs.org) o qual é ligado a *International Association of Geodesy* – IAG. Essas chamadas “soluções IGS” são geradas a partir de observações (medidas) aos satélites durante as passagens destes por estações de rastreamento, após o que elas são organizadas, processadas e ajustadas. Conforme o espaço de tempo que elas levam para serem disponibilizadas ao usuário final, são classificadas da seguinte forma em ordem crescente de qualidade:

- I. Ultra-rápidas: disponíveis com até três horas após a observação;
- II. Rápidas: disponíveis com dezessete horas após a observação;

III. Final: disponível aproximadamente 13 dias após a observação.

Portanto, sempre que possível, os dados devem ser processados no PPP após 13 dias do rastreamento, gerando coordenadas com a máxima de precisão possível (IBGE, 2017). Para soluções mais rápidas, podem ser consultadas as tabelas de precisão nominal informadas pelas entidades que oferecem este serviço de processamento.

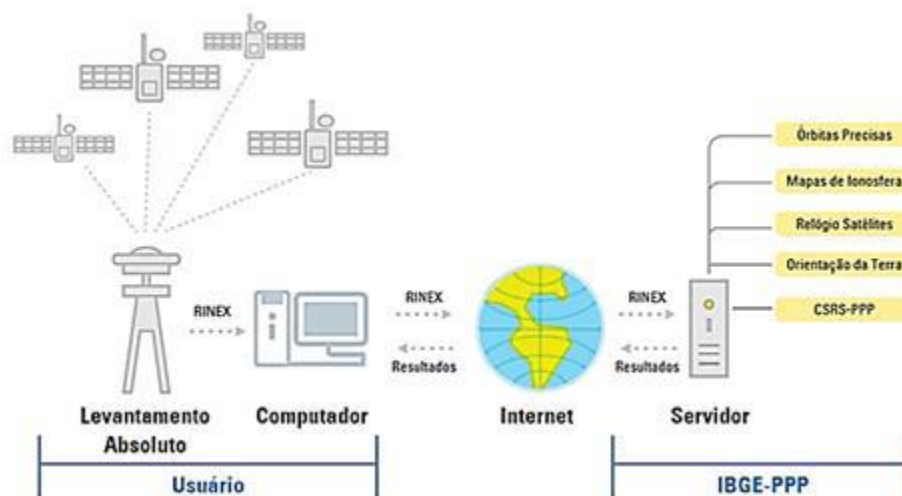
Várias entidades oferecem, inclusive de forma gratuita, serviços *on-line* de estimativa pelo método PPP das coordenadas de pontos ocupados por receptor GNSS cujos dados brutos são a elas submetidos. Algumas dessas entidades são: CSRS-PPP, disponibilizado pelo NRCan (*Natural Resources Canada*); GAPS (*GPS Analysis and Positioning Software*), da UNB (*University of New Brunswick - Canada*); APPS (*Automatic Precise Positioning Service*), do JPL (*Jet Propulsion Laboratory*).

No Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) faz uso do sistema CSRS-PPP e disponibiliza de forma gratuita este serviço, que se chama PPP-IBGE. Segundo IBGE (2017), o PPP-IBGE permite aos usuários com receptores GPS e/ou GLONASS obterem coordenadas de precisão no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS).

No PPP-IBGE é possível processar os dados GNSS (GPS e/ou GLONASS) coletados por receptores de uma ou duas frequências, no modo estático ou cinemático. Os dados de entrada devem estar no formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) 2.1 ou HATANAKA. Ele utiliza além das soluções IGS, a correção do centro de fase das antenas dos satélites e receptores, parâmetros de transformação ITRF/SIRGAS, modelo de carga oceânica e de velocidades, modelo de pressão, temperatura e umidade e o atual Modelo de Ondulação Geoidal – MAPGEO2015 (IBGE, 2017).

A Figura 7 mostra graficamente as etapas do PPP-IBGE. Primeiramente é realizado o rastreamento por levantamento absoluto, os dados nativos são importados para o computador para serem convertidos para o formato RINEX, o usuário envia o arquivo RINEX pela rede mundial de computadores – INTERNET, para o servidor do IBGE que os processa pelo CSRS-PPP e devolve ao usuário um arquivo em formato PDF com as coordenadas do ponto ocupado e a respectiva qualidade alcançada.

Figura 7 - Etapas do PPP-IBGE.



Fonte: IBGE, 2020.

#### 2.6.4 Posicionamento relativo em tempo real

Vários métodos de posicionamento foram desenvolvidos ao longo dos últimos anos para explorar a capacidade que o GNSS tem de prover coordenadas acuradas com um pequeno intervalo de tempo de coleta de dados ou, até mês, quando o receptor está se movendo ao longo de uma trajetória (SEEBER, 2003). Quando se trata do posicionamento relativo em tempo real, a técnica RTK tem se difundido ultimamente, especialmente devido às vantagens de operacionalidade por não exigir pós-processamento (solução instantânea) e precisão centimétrica. No entanto, existe a limitação devida aos problemas de comunicação entre os receptores base e móvel, a qual geralmente é feita por “link” de rádio. Esta limitação afeta a capacidade de abrangência deste método. Além disso, uma maior distância base-móvel pode aumentar os erros envolvidos no processo, os quais são proporcionais ao comprimento da linha de base, podendo ser limitante para algumas aplicações que exijam altíssima precisão.

Na prática, atualmente essa distância tem se restringido a algo em torno de 20 quilômetros aproximadamente, dependendo principalmente das condições da ionosfera. Para auxiliar na solução deste problema foi desenvolvido o conceito de rede

de estações de referência RTK, ou seja, as chamadas RTK em rede (ALVES et al., 2003).

## 2.7 Aerofotogrametria

Segundo Coelho e Brito (2007) etimologicamente, a palavra fotogrametria vem do grego photon (luz), graphos (escrita) e metron (medições) e significa medições executadas através de fotografias. Outra forma de expressar o termo seria a ciência e tecnologia de se obter informação confiável por meio de imagens adquiridas por sensores. Dentre essas tecnologias, destacam-se a utilização do sensoriamento remoto (SR) via satélite e de veículos aéreos não tripulados (VANT's). A técnica de fotogrametria digital permite a reconstrução de um espaço tridimensional, a partir de um conjunto de imagens bidimensionais adquiridas por meio de sensores ou câmeras fotográficas. Quando essas câmeras se encontram embarcadas em aeronaves, tem-se o conceito de aerofotogrametria, ou seja, a fotogrametria efetuada a partir de um aerolevanteamento de imagens.

Pode-se classificar, segundo Coelho e Brito (2002), vários objetivos da fotogrametria, sendo uma das principais a redução do trabalho de campo no levantamento de coordenadas de um ou vários objetos e o tempo de obtenção de tais informações. Contudo, o principal objetivo da fotogrametria é “a reconstrução de um espaço tridimensional, chamado de espaço-objeto, a partir de um conjunto não-vazio de imagens bidimensionais, chamado de espaço-imagem”.

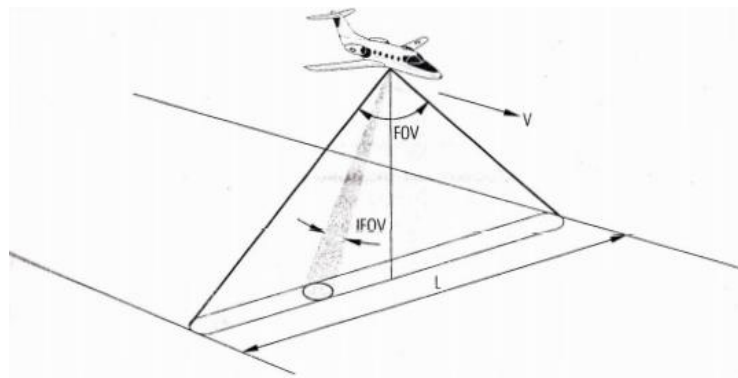
Segundo Silva (2015), há diversas razões por que o termo sensoriamento remoto se tornou restrito ao uso de sensores de radiação eletromagnética. Em primeiro lugar, a radiação não necessita de um meio de propagação, como os demais campos. Assim sendo, os sensores puderam ser colocados cada vez mais distantes dos objetos a serem medidos, até que passaram a ser colocados em satélites, dando também uma conotação de distância física à palavra “remoto”.

Os sistemas de sensoriamento remoto fornecem dados para diversas aplicações e podem ser utilizados em áreas urbanas, para fins de planejamento urbano e apoio ao setor imobiliário. Percebe-se a grande utilização na geologia, cartografia, oceanografia, hidrologia e na área florestal.

É importante entender que para cada trabalho executado, utiliza-se um tipo de sensor, por isso é importante conhecer as suas características para que se possa ter

o máximo de resolução espacial espectral e radiométrica. Nos sensores ópticos, a resolução espacial está relacionada diretamente ao campo de visada do sensor (*Field of View*) e do campo de visada instantâneo do inglês *Instantaneous Field of View* (IFOV). A Figura 8 ilustra a diferença entre FOV e IFOV.

Figura 8 - Diferença de FOV e IFOV.



Fonte: Lorenzetti, J.A. 2015

O IFOV é o ângulo de visibilidade instantânea do sensor e determina a área da superfície terrestre que é “vista” pelo mesmo. A dimensão da área do terreno é determinada pelo IFOV e pela distância do sensor à superfície imageada. Por sua vez, o FOV define a largura da faixa imageada pelo sensor.

$$D = H\beta \quad (4)$$

Onde:

D = distância do elemento de amostragem no terreno (em metros);

H = altura da plataforma (em metros);

$\beta$  = IFOV (em radianos).

$$\text{IFOV} = D/f \quad (5)$$

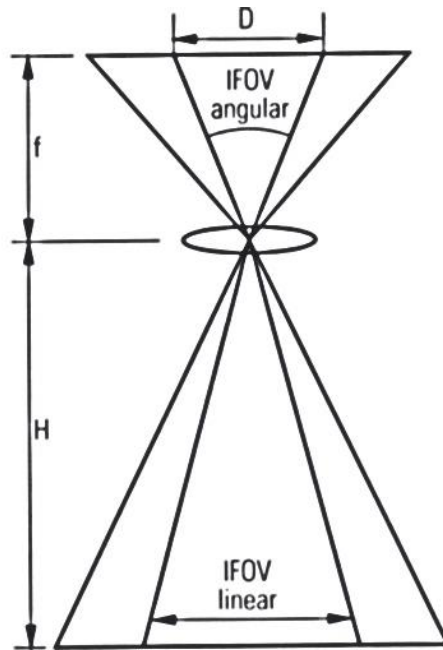
Onde:

D = dimensão do detector (metros)

f = distância focal do sistema óptico (metros)

A Figura 9 ilustra o IFOV para que seja possível perceber a relação entre as propriedades do sensor e a resolução espacial na superfície.

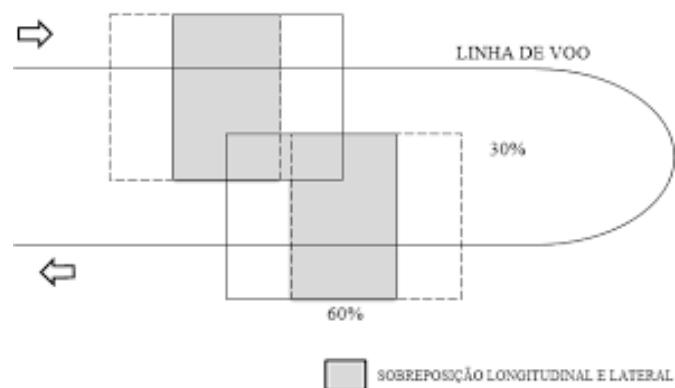
Figura 9 - IFOV



Fonte: Adaptada de Novo, 2010.

A Figura 10 mostra o recobrimento longitudinal de uma fotografia aérea. O planejamento aerofotogramétrico é geralmente realizado para prover aproximadamente 60% de superposição entre fotografias. Isso permite a obtenção da estereoscopia (3D) quando as duas são usadas em estereoscópio. A superposição entre faixas de voo varia de 20% a 40% e é chamada de Recobrimento Lateral.

Figura 10 - Recobrimentos lateral e longitudinal em um levantamento fotogramétrico.



Fonte: Adaptada de Novo, 2015.

É importante distinguir entre o elemento de resolução no terreno e o tamanho do *pixel*. A grande maioria das imagens dos sensores remotos é formada por matrizes de elementos de imagem ou *pixels*. Os *pixels* das imagens são geralmente quadrados e representam certa área no terreno.



Se um sensor tem uma resolução de 20 metros e uma porção da imagem é visualizada em resolução plena, o *pixel* e a resolução são termos equivalentes. Neste caso, o tamanho do *pixel* e a resolução espacial são os mesmos. Entretanto, é possível visualizar uma imagem com o tamanho do *pixel* maior do que a resolução do sensor.

### 2.7.1 Fotogrametria Digital

A fotogrametria digital surgiu, nos anos 1980, e teve 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, através de um *scanner*.

Nos anos 1990, esse ramo da fotogrametria realmente pôde ser usado de maneira extensiva, graças ao desenvolvimento de computadores com capacidade suficiente para o processamento interativo de imagens digitais, gerando elevados volumes de dados. A elaboração de produtos digitais (além das cartas digitais) que necessitam de processamento computacional extrema entre elaborado, como as ortoimagens ou imagens ortorretificadas (imagens em perspectiva ortogonal) e os mosaicos digitais, que consistem na junção de várias imagens. Esses mosaicos são considerados não controlados, se não houve tratamento sobre as imagens, ou controlados, caso as imagens já tenham sido ortorretificadas.

Os aparelhos atualmente empregados também mudaram. São chamados de estações fotogramétricas digitais (ou seja, estações de trabalho inteiramente voltadas para a fotogrametria). Computadores comuns também podem ser aproveitados para esse fim e são chamados de computadores repotencializados por receberem *hardware* e *software* específicos.

### 2.7.2 Pontos de apoio Aerofotogramétrico

Os pontos de apoio aerofotogramétricos (ou pontos de controle) são pontos no terreno com coordenadas conhecidas em um determinado sistema de referência e que podem ser claramente identificadas na fotografia, que servem de orientação.

De maneira geral, os pontos de controle devem ser visíveis e bem definidos em todas as fotografias que os imagearem, posicionados em locais adequados e,

posteriormente, levantadas suas coordenadas e executado o voo depois da obtenção das mesmas. Ainda, serem, simetricamente, centrados no ponto de controle e terem dimensões que proporcionem uma imagem adequada na fotografia. As dimensões do alvo devem ser escolhidas com base na escala desejada para fotografia. Vários são os tipos de alvos artificiais usados como ponto de apoio fotogramétrico. É desejável que tenha uma cor que possibilite um bom contraste de com o ambiente que está sendo fotografado (Peroni, 2016).

### 2.7.3 Fases do processo de produção fotogramétrica

Neste item será apresentada a sequência de procedimentos necessários para a geração de produtos fotogramétricos em sua Estação Fotogramétrica Digital.

I. **Preparação** – A fase de preparação começa com a definição do projeto, incluindo informações sobre o tamanho do projeto, tolerâncias, escala, calibração da câmera, pontos de controle e parâmetros do sistema.

II. **Procedimentos de orientação** - O processo de orientação determina o relacionamento entre o sistema de coordenadas da câmera e da imagem. Consiste em transformar as coordenadas das marcas conhecidas na fotografia para os valores fornecidos pelo certificado de calibração da câmera.

III. **Aerotriangulação** - Na fotogrametria digital, a aerotriangulação é realizada para obtenção das coordenadas dos pontos de apoio fotográfico, sendo automatizada e significando redução de tempo no processo de produção fotogramétrica. A execução desta operação é feita pelo método de correlação de imagem, envolvendo preparação do bloco de fotos, medição, cálculos e ajustamento das observações.

IV. **Produção de Ortofoto Digital** – A ortofoto equivale geometricamente ao mapa, com projeção ortogonal, de modo que, todos os pontos se apresentam na mesma escala. Assim, todos os elementos presentes nas fotografias podem ser medidos, vetorizados e representados na forma planificada para a medição de distâncias, posições, ângulos e áreas.

### 2.7.4 Resolução espacial do pixel no terreno e a escala do mapa

Segundo Brito (2002), quando se trata de imagens aéreas da superfície terrestre obtidas por meio de sensores digitais aerotransportados, o detalhe mais importante para a definição da precisão e da acurácia com que se necessita obter o produto cartográfico não é a escala da foto e a altitude de voo, como no caso de câmeras aéreas convencionais, e sim o tamanho ou resolução espacial do pixel no terreno, também conhecido com GSD (em inglês, *Ground Sample Distance*).

Para a definição do GSD, que corresponde ao tamanho do pixel no terreno, este parâmetro está para a fotogrametria digital como a escala do voo (calculada como a razão entre a distância focal e a altura de voo) está para a fotogrametria convencional. Podendo-se calcular a GSD como:

$$\frac{f}{h_v} = \frac{d}{GSD} \quad (6)$$

Sendo,

$h_v$  – Altura de Voo,

$f$  – Distância Focal da Câmera

$d$  = Dimensões Físicas do *Pixel* no Sensor CCD.

Um importante marco na cartografia brasileira foi a regulamentação do Decreto-lei nº 89.817, de 20 de junho de 1984 (BRASIL, 1984), o qual normatiza os critérios para a classificação dos produtos cartográficos nacionais quanto à sua exatidão, fundamentado pelo parâmetro estatístico da dispersão e chamado de Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). Em termos classificatórios, o PEC disponibiliza uma classificação para os produtos cartográficos, conforme sua exatidão, enquadrando em classe A, B ou C. Cabe destacar que em seu artigo 8º, inciso 1º, a norma define que a estatística de exatidão de trabalhos cartográficos deve ser enquadrada em uma probabilidade de 90%, ou seja, noventa por cento dos pontos bem definidos no produto cartográfico, quando avaliados na superfície física, não deverão apresentar erro superior ao PEC. Este limiar é importante porque norteia os testes estatísticos (SANTOS 2016; BRUCH et al., 2019). Em termos conceituais, o referido decreto também é importante porque traz a elucidação de termos como Desvio Padrão (DP), Erro Padrão (EP) e Erro Quadrático Médio (EQM), considerando-os como sinônimos, além dos termos de acurácia e exatidão posicional (BRASIL, 1984).

Com o advento de novas tecnologias, principalmente com a cartografia digital, foram implementados novos padrões de qualidade pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro – DSG (2011), surgindo em 2016, como complemento ao PEC, as Especificações Técnicas Para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG). A ET-CQDG, estabelecendo as tolerâncias para que um produto cartográfico digital possa ser aceito no Sistema Cartográfico Nacional (SCN), e conseqüentemente, para a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE). Da ET-CQDG se extrai o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), que é uma evolução da PEC de 1984 (OLIVEIRA; BRITO, 2019; BRUCH et al., 2019).

A ET-CQDG, segundo a DSG (2016), define os novos procedimentos de controle de qualidade dos produtos cartográficos digitais nacionais. Esta norma busca padronizar a metodologia utilizada na análise da qualidade dos produtos integrantes do SCN brasileiro, e com isso, permitindo que os dados sejam comparados e avaliados dentro de uma mesma escala e estrutura (OLIVEIRA; BRITO, 2019).

Sendo assim, concordando com a Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR), para que um produto digital possa ser aceito como produto de referência do Sistema Cartográfico Nacional (SCN) e, conseqüentemente, para a INDE, a exemplo do previsto para a PEC, para produtos impressos em papel, noventa por cento (90% ou  $1,6449 \cdot EQM$ ) dos erros dos pontos coletados no produto cartográfico/topográfico (ortoimagem ou ortomosaico), quando comparados às suas coordenadas homólogas levantadas em campo por método de alta precisão, devem apresentar valores iguais ou inferiores aos previstos na PEC e Produtos da Cartografia Digital (PCD). Ainda, devem apresentar valores de EQM iguais ou inferiores aos EPs previstos na norma, para a escala e classe objetivada, conforme indicado a seguir, concordando com Elias *et al.* (2017).

A Tabela 2 apresenta a PEC-PCD com as precisões Planimétricas e o EP das classes “B”, “C” e “D”, as quais correspondem, nessa ordem, às classes “A”, “B”, “C” do PEC Planimétrico previstas no Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984.

Tabela 2 - PEC-PCD Planimétrico

PEC	PEC-PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
-	A	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70	7,00	4,25	14,00	8,51	28,00	17,02	70,00	42,55
A	B	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00	12,50	7,50	25,00	15,00	50,00	30,00	125,0	75,00
B	C	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00	20,00	12,50	40,00	25,00	80,00	50,00	200,0	125,0

C	D	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	25,00	15,00	50,00	30,00	100,0	60,00	250,0	150,0
---	---	------	------	------	------	------	------	-------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Fonte: CONCAR, 2011.

Já a Tabela 3, estabelece o PEC-PCD para os Modelos Digitais de Terreno (MDT), de Elevação (MDE) e de Superfície (MDS) e para os Pontos Cotados. Os valores previstos para a classe “A” (PEC-PCD) foram definidos a partir de adaptações dos estudos realizados por Merchant (1982) e ASPRS (1989), nos quais o PEC-PCD = 0,27\*Equidistância do produto cartográfico e o EP = 1/6\*Equidistância do produto cartográfico. As classes “B”, “C” e “D” do PEC-PCD correspondem, em ordem, as classes “A”, “B”, “C” do PEC Altimétrico previstas no Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984.

Tabela 3 - PEC-PCD para os Modelos Digitais de Terreno (MDT), de Elevação (MDE) e de Superfície (MDS)

PEC	PEC - PCD	1:1,000 (Eqd=1m)		1:2,000 (Eqd=1m)		1:5,000 (Eqd=2m)		1:10,000 (Eqd=5m)		1:25,000 (Eqd=10m)		1:50,000 (Eqd=20m)		1:100,000 (Eqd=50m)		1:250,000 (Eqd=100m)	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
-	A	0.27	0.17	0.27	0.17	0.54	0.34	1.35	0.84	2.70	1.67	5.50	3.33	13.70	8.33	27.00	16.67
A	B	0.50	0.33	0.50	0.33	1.00	0.66	2.50	1.67	5.00	3.33	10.00	6.66	25.00	16.66	50.00	33.33
B	C	0.60	0.40	0.60	0.40	1.20	0.80	3.00	2.00	6.00	4.00	12.00	8.00	30.00	20.00	60.00	40.00
C	D	0.75	0.50	0.75	0.50	1.50	1.00	3.75	2.50	7.50	5.00	15.00	10.00	37.50	25.00	75.00	50.00

Fonte: CONCAR, 2011.

A seguir são indicadas, respectivamente, as fórmulas utilizadas para calcular o EMQ para a planimetria e altimetria.

$$RMS_{xy} = EMQ_{xy} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{iT} - X_{iC})^2 + (Y_{iT} - Y_{iC})^2}{n}}$$

(7)

onde: n – é o número de pontos da amostra

$X_{iT}$ ,  $Y_{iT}$  – Coordenadas planimétricas obtidas em campo, para o ponto i

$X_{iC}$ ,  $Y_{iC}$  – Coordenadas planimétricas do mesmo ponto na Ortoimagem.

A fórmula a utilizar no cálculo do Erro Médio Quadrático para a altimetria:

$$RMS_z = EMQ_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{iT} - Z_{iC})^2}{n}}$$

(8)

onde: n – é o número de pontos da amostra

$Z_{iT}$  – Cota altimétrica obtida em campo, para o ponto i

$Z_{iC}$  – Cota altimétrica do mesmo ponto na Ortoimagem.

### 2.7.5 Modelo Digital de Terreno (MDT)

Segundo MOUTINHO (2015), um MDT (Modelo Digital de Terreno) ou DTM (*Digital Terrain Model*) ou ainda MNT (Modelo Numérico de Terreno) pode ser definido como uma representação matemática computacional que descreve a superfície.

As funções matemáticas empregadas são denominadas interpolações e a superfície a ser representada é a superfície modelada. Ao conjunto formado pelos dados discretos, as funções de interpolação e os recursos de uso prático da superfície modelada dá-se o nome de MDT (PETTINATTI, 1983).

De acordo com Munaretto (2017) o Modelo Digital de Terreno pode ser empregado em variados ramos da engenharia que utiliza informações sobre relevo do terreno, como:

- I. Traçado de curvas de nível;
- II. Traçado de perfis do terreno;
- III. Terraplenagem;
- IV. Cálculo de volumes;
- V. Mapas de declividade;
- VI. Retificação de imagens aéreas para geração de ortofotos;
- VII. Outros.

Além dos produtos básicos descritos acima, dependendo da aplicação desejada, pode-se gerar:

- I. Mapas de declividade;
- II. Determinação de linhas de visadas;
- III. Determinação de redes de drenagem.

Aplicativos de computador desenvolvidos para tal fim realizam este tipo de trabalho. O programa contém módulos para a captura de dados, para a modelagem da superfície e para geração de produtos derivados.

O MDT desconsidera os elementos que impeçam a visada direta ao solo ou terreno, tais como vegetação, construções, veículos e outros. Ao modelo que considera os elementos existentes acima do nível do terreno e visíveis nas fotos, dá-se o nome de Modelo Numérico de Superfície - MNS ou Modelo Digital de Superfície - MDS. Segundo PETTINATTI (1983) quando uma superfície é modelada a partir de pontos gerados automaticamente, tem-se um MDS. Para se obter o MDT, são aplicadas técnicas de classificação e filtragem de pontos, a partir das quais, todos os elementos não pertencentes ao terreno são ocultados.

A aquisição dos dados de campo para modelagem de terreno consiste basicamente no emprego de técnicas de determinação de coordenadas tridimensionais de pontos característicos da superfície do terreno, conforme indicado a seguir:

- I. Nivelamento geométrico;
- II. Nivelamento trigonométrico;
- III. Nivelamento a partir do GNSS;
- IV. Escaneamento terrestre;
- V. Escaneamento aéreo LIDER ou RADAR;
- VI. Malhas de pontos geradas a partir de técnicas aerofotogramétricas manuais ou por correlação automática de imagens;
- VII. Digitalização de documentos cartográficos.

Independente da técnica de medição acima citada, o resultado será um arquivo com número do ponto e as coordenadas tridimensionais (N,E,Z) de cada ponto.

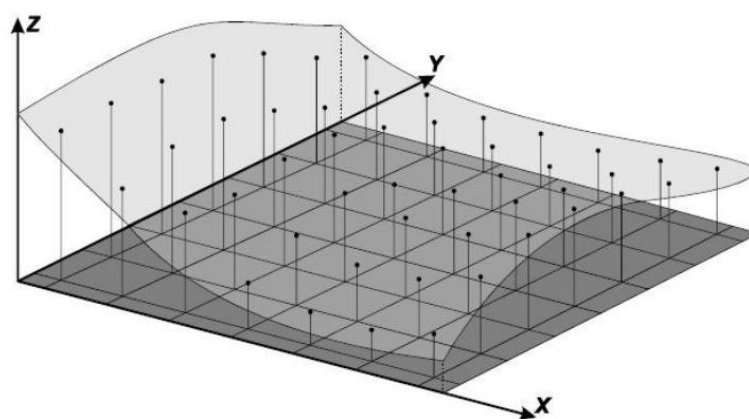
A estruturação dos dados coletados em campo consiste na organização geométrica dos mesmos, tendo em vista a modelagem da superfície e podendo ser pontual, triangular, malha regular e híbrida.

#### 2.7.6 Estruturação dos dados em uma malha regular

A malha regular pode resultar diretamente na distribuição geométrica dos dados coletados em campo, que já podem ser levantados na forma de uma malha

regular, ou pode resultar da aplicação de um método de interpolação em função dos pontos vizinhos aos vértices da malha (Figura 11).

Figura 11 - Grade retangular regular.



Fonte: INPE, 2013.

### 2.7.7 Estruturação dos dados em uma rede triangular

Segundo Ferreira (2017) a estruturação dos dados coletados em campo são unidos 3 a 3 de maneira a formarem uma rede de triângulos unindo todos os pontos disponíveis para o modelo. A este processo de formação de triângulos dá-se o nome de triangulação ou TIN (Triangulated Irregular Network).

Existem três condições para a formação dos triângulos de um MDT:

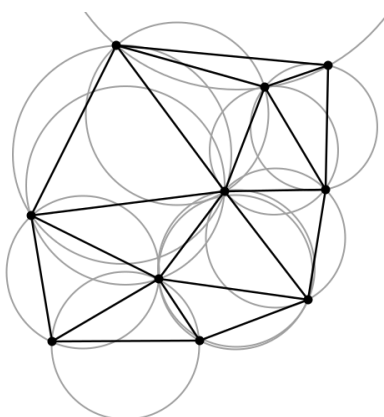
- a) Para cada conjunto de pontos, o TIN gerado deve ser único;
- b) A forma geométrica dos triângulos deve ser otimizada para que cada triângulo seja o mais equilátero possível;
- c) Cada triângulo é formado pelos vizinhos mais próximos, ou seja, a soma dos três lados deve ser a mínima possível.

Segundo Truler (2015), existem inúmeros algoritmos para geração de TIN, mas o que satisfaz as três condições acima é o algoritmo de *Triangulação de Delaunay* (Figura 12). Este tipo de algoritmo inicia a escolha do ponto de partida de um ponto



situado no centro geométrico do conjunto de dados, sendo que após isso o próximo passo consiste em encontrar o ponto mais próximo para formar a base do primeiro triângulo. Em seguida, cria-se um círculo com diâmetro igual à distância entre os pontos e verificam-se quantos pontos estão inseridos no círculo. Caso tenha apenas um ponto, ele é escolhido como o terceiro vértice do triângulo. Se houver mais de um ponto, escolhe-se aquele que formar o maior ângulo entre o vértice e a base preestabelecida.

Figura 12 - Exemplo de Triangulação de Delaunay.



Fonte: Adaptado de Guedes, 1996.

A superfície a ser modelada apresenta linhas representativas de acidentes geográficos do relevo e essas devem ser consideradas no processo de formação do TIN. Este tipo de linha chama-se *Breakline* (linha de quebra). Desta forma, nenhum triângulo pode cruzar uma *breakline*.

### 2.7.8 Modelagem da superfície

Em superfícies tridimensionais, ela consiste em determinar a superfície que descreve o comportamento de um conjunto de pontos definidos por suas coordenadas (X,Y,H). As coordenadas (X,Y) são as variáveis independentes e (H) a variável dependente, de forma que o valor da variável (H) pode ser calculado para quaisquer valores de (X,Y) pertencentes ao domínio da função H, conforme a equação 9:

$$H = f(X,Y)$$

(9)

Para o caso de uma modelo numérico de terreno, as funções de interpolação são usadas para determinar a altitude ( $H_p$ ) de um ponto (P) qualquer, a partir de valores conhecidos das altitudes ( $H_i$ ) de seus vizinhos.

## 2.8 Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT)

Com o advento das geotecnologias, foi possível o mapeamento com alta resolução temporal e espacial, principalmente, após a difusão dos aerolevamentos de baixo custo, através de equipamentos como os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT's), apoiados com o uso de *Global Navigation Satellite System* - GNSS (BARCELOS, 2017). A utilização de VANT's em trabalhos técnicos e científicos se difundiu rapidamente ao longo da última década, em especial em áreas de mineração, meio ambiente e urbanização, possibilitando levantamentos planialtimétricos precisos e fiscalizações mais incisivas, permitindo aos órgãos governamentais um maior controle fiscal e ambiental (RIBEIRO JÚNIOR, 2011; MUNARETTO, 2017).

Na área de geotecnologias, a evolução tecnológica dos equipamentos é contínua, assim como das metodologias de mapeamento. Mais especificamente referindo-se aos aerolevamentos, novos modelos de VANT's, multirotores ou de asas fixas, estão sendo aprimorados pelos fabricantes, basicamente seus sensores e estabilizadores, assegurando maior precisão em posicionamento e qualidade do produto gerado. Aspectos como eventuais obstáculos no terreno, dificuldades de acesso, adensamento vegetal, entre outros, dificultam a aquisição de pontos de controle em solo ou o levantamento das áreas a serem mapeados (JORGE, 2003; MUNARETTO, 2017; ZHANG et al., 2019; LOSE; CHIABRANDO; TONOLO, 2020; KURKOV; KISELEVA, 2020).

Para a execução dos processos de retificações das imagens, que conduzem à obtenção de produtos finais de sensoriamento remoto, são necessários alguns procedimentos de campo, especialmente a coleta de dados em solo através de alvos naturais ou artificiais. A implantação desses alvos deve ser em quantidade suficiente para a adequada cobertura da área e representativa do relevo, bem como de fácil e

precisa identificação nas imagens no software aerofotogramétrico (SANTOS *et al.*, 2011; BOLKAS, 2019). Essas tarefas nem sempre são triviais e tornam o processo mais dispendioso e dificultoso do ponto de vista operacional, além do inevitável aumento do custo, especialmente devido à necessidade de pessoal, tempo de distribuição e materiais adequados.

Na legislação em vigor para voos através de VANT, a ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) define VANT como RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*) que significa “Sistema de Aeronaves Remotamente Pilotadas”. Ela constitui uma subcategoria dos Veículos Aéreos Não Tripulados e exclui as aeronaves não tripuladas totalmente autônomas, ou seja, mesmo o avião exercendo suas atividades automaticamente, o voo deve ser monitorado e, o operador devidamente treinado, deve ter a capacidade de interferir a qualquer momento. Atualmente, para a execução de voos com VANT é necessária uma autorização da ANAC, chamada de CAVE (Certificado de Autorização de Voo Experimental) e do DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) chamado NOTAM (“*Notice to Airmen*”) que significa “Aviso aos Aeronavegantes”, que tem por finalidade divulgar antecipadamente toda informação aeronáutica que seja de interesse direto e imediato à segurança. Para isso, é importante esclarecer os tipos de equipamentos e suas categorias.

VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) é a terminologia oficial prevista pelos órgãos reguladores brasileiros do transporte aéreo para definir este tipo de veículo. A legislação brasileira caracteriza como VANT toda a aeronave projetada para operar sem piloto a bordo, mas de caráter não recreativo e com carga útil embarcada. Ou seja, nem todo DRONE pode ser considerado um VANT, já que um Veículo Aéreo Não Tripulado utilizado como hobby ou esporte enquadra-se, por definição legal, na legislação pertinente aos aeromodelos e não na de um VANT.

Do mesmo modo, há dois tipos de VANT. O primeiro e mais conhecido é o ARP - Aeronave Remotamente Pilotada, ou RPA na sigla em inglês (*Remotely-Piloted Aircraft*). Nesta subcategoria, o piloto não está a bordo, mas controla a aeronave remotamente a partir de uma interface qualquer (computador, simulador, dispositivo digital, controle remoto). A outra subcategoria de VANT é a chamada "Aeronave Autônoma" que, uma vez programada, não permite intervenção externa durante a realização do voo. No Brasil, as aeronaves autônomas têm o seu uso proibido. Assim, o termo ARP é a terminologia correta para se referir a aeronaves remotamente

pilotadas de caráter não recreativo - um equipamento que deve se submeter à legislação vigente.

Há ainda a categoria SARP, ou Sistema de ARP. Além da aeronave, um SARP inclui todos os recursos necessários para que a aeronave voe: a estação de pilotagem remota, a conexão ou enlace de comando que possibilita o controle da aeronave, os equipamentos de apoio. É comum também o uso do termo em inglês RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*).

### **2.8.1 Categorias de VANT**

Embora os multirrotores dominem mais de 70% do mercado de VANT's, eles não são a única opção. Uma das maiores dúvidas ao se investir em um VANT profissional é a escolha entre um equipamento de asa fixa ou multirotor também conhecido como asa fixa ou rotativa. Cada um deles tem vantagens e desvantagens, que os tornam mais adequados para determinados usos, por isso é importante entender as principais diferenças entre os dois tipos.

As diferenças entre os dois modelos estão relacionadas à parte estrutural da aeronave, em que a asa fixa apresenta braços com motores elétricos nas pontas ou na parte frontal. Uma vez no ar, as duas asas geram sustentação que compensa seu peso permitido que a aeronave permaneça em voo. Já o multirotor é construído com um corpo central e múltiplos rotores que rotacionam hélices para manobrar a aeronave. Os mais comuns são os que possuem quatro (quadricópteros), seis (hexacópteros) ou oito (octacópteros) rotores.

Os de asa fixa geralmente necessitam de pista de colagem e pouso, podendo também ser lançados por catapultas manuais. Segundo Munaretto (2017) VANT's de asa rotativa, possuem capacidade de decolar e pousar na vertical, além de pairarem no ar através de comandos manuais e automáticos quando necessário. Os veículos com asas rotativas dominam o mercado de drones com preços competitivos se compararmos com os de asa fixa, além disso possibilitam maior capacidade de carga útil devido ao seu design, já em contrapartida uma limitação dos multirrotores é área mapeada em uma única bateria, podendo voar aproximadamente por apenas 30 minutos.

A Figura 13 apresenta as duas categorias de aeronaves descritas.

Figura 13 - Categoria de VANT



Fonte: O autor

Para melhorar a comparação e entendimento, organizou-se em formato de tabela das principais vantagens e desvantagens dos VANT's de asa fixa e os multirrotores, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Vantagens e desvantagens entre os modelos de VANT's

Resumo comparativo	Asa rotativa	Asa fixa
Facilidade na pilotagem	●	●
Menor preço	●	●
Tamanho/portabilidade	●	●
Estabilidade	●	●
Cobertura de área mapeada	●	●
Capacidade de carga	●	●
Sistema de decolagem e pouso	●	●
Autonomia de voo	●	●

Fonte: O autor

De modo geral, os dois tipos de aeronaves possibilitam a obtenção de resultados de qualidade. Mas a escolha em qual equipamento investir não é tão simples, sendo necessária uma análise das características citadas acima e uma prospecção dos produtos que necessitam gerar para atender as expectativas.

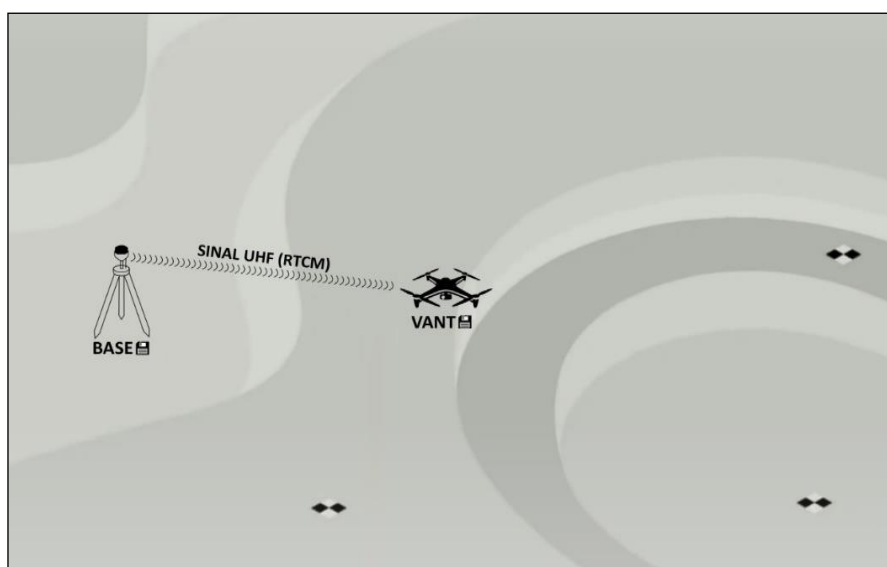
### 2.8.2 Método de correção

A migração de grande parte dos serviços de topografia clássica para o emprego do sistema GNSS na técnica RTK (*Real Time Kinematic*) ou PPK - *Post Processed Kinematic* Já estão bem difundidas entre comunidade de profissionais de agrimensura devidas o avanço da tecnologia de transmissão de dados. Conhecendo

bem a metodologia e com a miniaturização dos dispositivos, os mesmos foram adaptados/embarcados nos VANT's tanto nos modelos de asa fixa como multirotores, facilitando assim o emprego na fotogrametria com pequenas aeronaves.

A utilização do método Relativo, tanto em tempo real ou pós-processada necessita de um receptor GNSS, registrando dados em um ponto de referência conhecido, servindo este como uma referência geodésica estática para o VANT que está em movimento (MUNARETTO, 2019). Segue figura abaixo ilustrando o uso das duas técnicas, PP + RTK em um aerolevanteamento com VANT (Figura 14).

Figura 14 - Técnica RTK/UHF + armazenamento de dados



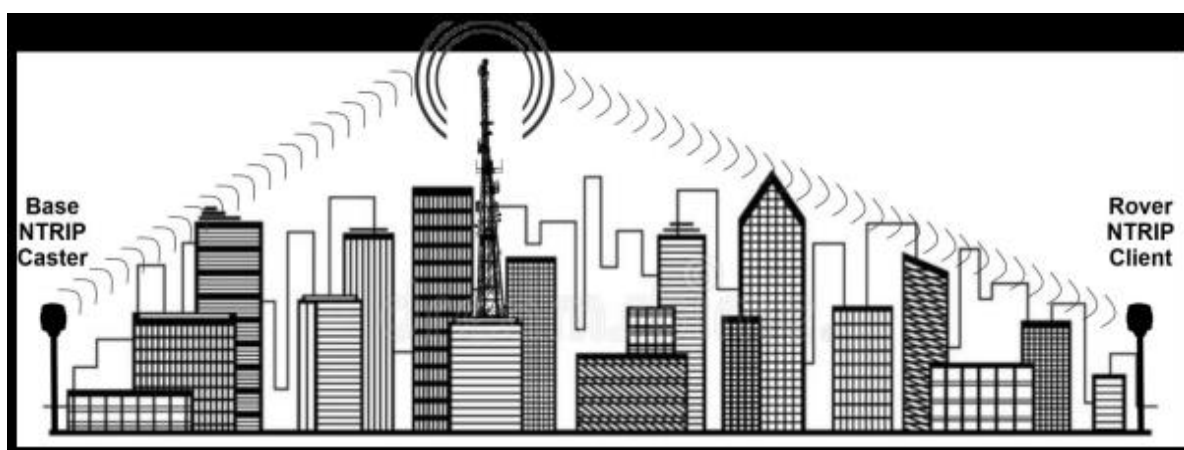
Fonte: O autor

Segundo Monico (2008), a utilização da técnica RTK se deu com a possibilidade de transmissão de observações da medida de fase da onda portadora a partir de um receptor base com coordenadas conhecidas transmitida para estação móvel, neste caso a aeronave, operando via técnica RTK/UHF ou RTK/GSM conforme Guandalini (2012). O padrão RTCM foi desenvolvido pela *Rádio Technical Commission for Maritime Service*, conhecida pela sigla RTCM, este protocolo transmitido é conhecido como RTCM, formato padrão que permite a transmissão de informações, de mais diversas, relacionadas com o emprego da tecnologia GNSS (Figura 15).

O receptor embarcado deverá processar os dados em tempo real, calculando de forma instantânea o vetor de ambiguidades da fase da onda da portadora. Sendo

assim, esse sistema é totalmente dependente da conexão entre base, VANT e satélites. Este tipo de correção é realizado nos dados coletados pelo GNSS do VANT em relação à coordenada fixa do receptor em tempo real, garantido precisão na ordem de 10 mm.

Figura 15 - Ilustração da técnica RTK/GSM



Fonte: O autor

Na técnica PPK ou posicionamento relativo cinemático, utiliza-se também como observável a fase da onda portadora, embora não ocorra conexão de dados em tempo real. Neste método, um receptor GNSS ocupa uma coordenada conhecida enquanto o outro que está embarcado na aeronave irá se deslocar em um plano de voo conhecido e gerado em um software específico. As observações simultâneas dos dois receptores possibilitam calcular as Duplas Diferenças (DDs), em que vários erros envolvidos nas observáveis são reduzidos, portando neste método o processamento dos dados irá ocorrer no escritório, após a coleta dos mesmos a campo.

Com os conceitos descritos acima, percebe-se que a principal vantagem do PPK está no armazenamento de dados, assegurando correções pós processadas no aerolevanteamento ao contrário do RTK poderá sofrer interferências diversas, comprometendo a correção das observações GNSS gerados pelo RTK durante um período de tempo e, conseqüentemente a precisão do trabalho.

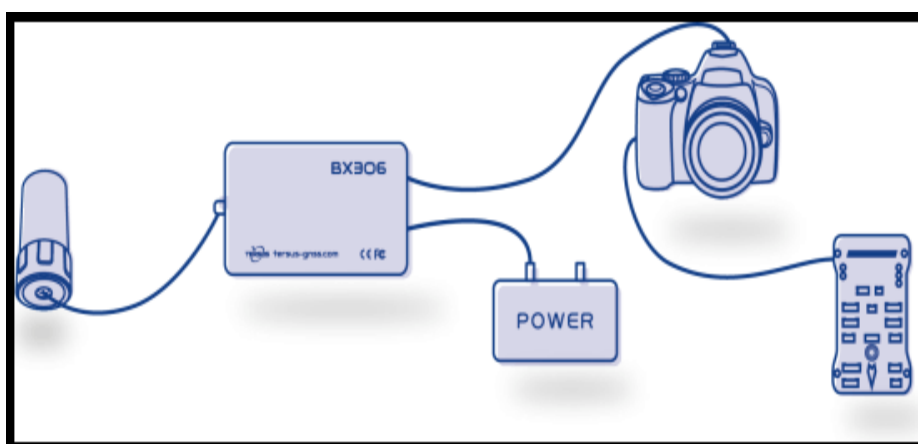
A diferença de investimento é grande entre os dois sistemas de correção, pois sistema RTK exige um receptor GNSS equipado com um transmissor de rádio UHF

específico em solo, ao contrário do sistema PPK que opera com qualquer modelo de receptor GNSS.

### 2.8.3 Sistema PPK

Na Figura 16 abaixo, pode-se observar o esquema de funcionamento do sistema PPK. A placa receptora GNSS está sendo alimentada por energia proveniente do drone ou por uma fonte externa e ligada a uma antena GNSS. Através de um cabo flat a câmera está ligada ao receptor. No momento do disparo, o sensor emite um pulso de luz através do seu flash para o receptor GNSS que registra o tempo de observação. Desta forma toda imagem capturada terá um registro no receptor, podendo ser, posteriormente, processada e atualizada a posição geocêntrica de cada imagem do plano de voo.

Figura 16 - Esquema de montagem do sistema PPK.



Fonte: [www.tersus-gnss.com](http://www.tersus-gnss.com).

Vários fabricantes de VANT's acabaram desenvolvendo seus dispositivos, e, assim, embarcaram nas aeronaves como uma ferramenta.

A Tabela 5 apresenta uma lista de diferentes modelos de VANT's que possuem embarcados de fábrica o *RTK/PPK* e comercializados no Brasil.



Tabela 5 - Modelos de VANT's que possuem embarcados de fábrica o RTK/PPK

Fabricante	Modelo	Tipo	Frequência	Tipo de correção	Tempo de voo (min)	Preço (R\$)
DJI	Phantom 4 RTK	Rotor	L1L2	RTK	20	72.000,000
Xmrobots	Arator 5B	Asa	L1L2	PPK/PPK	87	95.900,00
SkyDrones	Zangão 5	Asa	L1L2	PPK/PPK	60	89.000,00
SenseFly	eBee X	Asa	L1L2	PPK/PPK	90	100.000,00
Horus	Maptor HS	Asa	L1L2	PPK/PPK	90	110.500,00
Horus	Maptor AG	Asa	L1L2	PPK/PPK	90	112.000,00
Horus	Verok	Asa	L1L2	PPK/PPK	120	130.000,00
Trimble	UX5	Asa	L1L2	PPK/PPK	60	160.000,00

Fonte: O autor

Da mesma forma, outras empresas desenvolveram KITS de fácil instalação, tipo plug and play. A Tabela 6 apresenta uma lista de diferentes modelos de *kits* PPKs comercializados no Brasil e no mundo.

Tabela 6 - Modelos de kits PPKs comercializados no Brasil e no mundo

Fabricante	Disponível para:	Auton do voo	Instalação	Software de PP	Preço (R\$)
GUANDALINI	P4 ADV/PRO, MAVIC 2 PRO	100%	Próprio usuário	GPPK	12.900,00
HORUS	Linha Phantom	70%	5 dias úteis na bancada	Não possui	11.300,00
TUFFWING	Linha Phantom	100%	Próprio usuário	Não possui	13.500,00
NOVARUM SKY	Linha Phantom	100%	Próprio usuário	EtherCopter RTK- PPK V10	11.200,00
COPTERLab	P4 ADV/PRO	100%	Próprio usuário	Não possui	9.900,00
TopoDrone	P4 ADV/PRO	100%	Próprio usuário	GNSS Geodata	15.500,00

Fonte: O autor (2021)

## 2.8.4 Receptores GNSS

Existem vários fornecedores de receptores GNSS de pequeno porte e variados tipos de conexão, sendo elas via cabo serial (padrão DB9), bluetooth e USB. A principal característica está na capacidade de armazenamento de dados brutos e, posteriormente, a conversão para um formato universal (RINEX 2.1 ou 3.0) para realizar o pós-processamento em qualquer software de processamento de dados.

Outros fatores importantes estão ligados diretamente à capacidade de rastrear sinais das principais constelações de sistemas de posicionamento global, GPS e GLONASS, e possibilidade de rastrear sinais L1 e L2. Na Tabela 7, foram elencados alguns modelos de receptores passíveis de serem embarcados em VANT's.

Tabela 7 - Modelos de receptores passíveis de serem embarcados em VANT's

Fabricante	Modelo	Frequências	Sistemas de rastreio	Dimensões (mm)	Peso (gramas)	Preço (R\$)
<b>EMLID</b>	REACH M+	L1	GPS/GLONAS /Galileo/BeiDou	56.4 x 45.3 x 14.6	20	2700,00
<b>EMLID</b>	REACH M2	L1L2L5	GPS/GLONAS /Galileo/BeiDou	56.4 x 45.3 x 14.6	20	4600,00
<b>Ublox</b>	NEO-M8P	L1L2	GPS/GLONAS /BeiDou	17 x 22.4 x 2.4	16,5	1.920,00
<b>Ublox</b>	NEO-M8U	L1	GPS/GLONAS /Galileo/BeiDou	75x25x13	16,5	1.200,00
<b>Ublox</b>	NEO-M8T	L1	GPS/GLONAS / BeiDou	40x18	16,5	1390,00
<b>Tersus</b>	<b>BX306</b>	L1L2	GPS/GLONAS /BeiDou	100.2 x 57.4 x 24	23	4.760,00

Fonte: O autor (2021)

Os receptores podem ser de diferentes configurações, mas o importante é que tenham as dimensões e, principalmente, pesos adequados ao VANT em que será embarcado, em função da carga que irão representar. Na Figura 17, foram elencados alguns modelos de receptores passíveis de serem embarcados em VANT's.

Figura 17 - Modelos de receptores GNSS



Fonte: Google

### 2.8.5 Antenas GNSS

Outro componente importante para o perfeito funcionamento do sistema que irá garantir a precisão são as antenas GNSS. Segundo LIMA (2018), as antenas são a principal conexão entre os segmentos Espaciais e o Segmento do Usuário, por serem responsáveis pela captura do sinal da banda L provenientes do espaço, cujas dimensões e configurações são dadas em função do comprimento da onda.

Toda antena tem função de capturar uma parte de energia proveniente das ondas eletromagnéticas recebidas e convertê-las em uma corrente elétrica que possa ser processada pelo receptor (MONICO, 2008).

Segundo SEEBER (2003) os tipos de antenas disponíveis para os receptores são os mono ou dipolo, helicoidal, helicoidal-espiral, microstrip ou patch e choque ring.

Para CHEIN (2012) quanto maior o número de bandas, maior será a faixa de frequência que a antena será capaz de rastrear e, mais complexa será a sua concepção. Portanto, para decidir qual modelo de antena será utilizado, deve-se observar as seguintes características: frequência de cobertura do receptor compatível, ganho, supressão do multicaminhamento, centro de fase e seus parâmetros físicos. Na Tabela 8, foram elencados alguns modelos de antenas receptoras passíveis de serem embarcados em VANT's.

Tabela 8 - Modelos de antenas passíveis de serem embarcados em VANT's

Fabricante	Modelo	Frequência de operação	Rastreo	Dimensões (mm)	Ganho (dB)	Preço (Reais)
TALLYSMAN	HC771	L1	GPS/GLONAS/Galileo/BeiDou	33,3 x 28,5 x 54,2	28	4.424,00
TALLYSMAN	TW1721	L1	GPS/GLONAS/Galileo/BeiDou	35 x 8,8	28	2.744,00
TALLYSMAN	TW3865	L1L2	GPS/GLONAS/Galileo /BeiDou	51 x 15,4	28	6.104,00
TALLYSMAN	HC977	L1L2L5 L-Band	GPS/GLONAS/Galileo/BeiDou	44,2 x 38,8 x 62,4	35	7.784,00

Fonte: O autor

Na Figura 18 é apresentado o modelo elicoidal quadrifilar estrutura para receber os sinais de GPS L1/L2, GLONASS G1/G2, BDS B1/B2/B3 e GALILEO E1/E5b bandas, que apresenta alto ganho zenital, favorável baixo ganho de elevação, grande-angular de polarização circular e centro de fase estável.

Figura 18 - Modelo de antena GNSS modelo HC771



Fonte: Tallysman (2021)

Segundo Bruch (2019) existem diversas opções de equipamentos e métodos de levantamento topográficos. Com isso surgem alguns questionamentos: qual a diferença dos dados obtidos pelo VANT em relação aos outros equipamentos? Essas e outras dúvidas surgem por parte de gestores e profissionais na área de engenharia que participam ativamente da tomada de decisão nas empresas. O que se nota é a significativa diferença de densidade de pontos entre um levantamento convencional

com estação total, GNSS e VANT, principalmente, em áreas com obstáculos (rochas e água), topografia acidentada e acessibilidade. Cada tecnologia empregada em levantamentos topográficos possui um custo, que pode ser por operador ou escritório. A Tabela 9 mostra diferenças entre os métodos de levantamento, considerando a tecnologia, sem considerar o custo operacional de campo e escritório em uma cava a céu aberto.

Tabela 9 - Diferenças entre os métodos de levantamento, considerando a tecnologia

<b>Tipos de equipamentos</b>	<b>Número de pontos 16 minutos/100m (altura)</b>	<b>Custo do médio equipamento (Reais)</b>
Estação Total	256	25.000,00
Sistema RTK	480	80.000,00
VANT com ponto de controle em solo PP	1.944.427	40.500,00
VANT com KIT PPK	1.944.427	50.000,00
VANT com RTK	1.944.427	65.000,00
VANT com receptor embarcado	1.944.427	37.775,00

Fonte: O autor

Na tabela acima, observa-se que a produtividade e precisão da tecnologia VANT, nos três modos de levantamento, são muito superiores ao levantamento realizado com os instrumentos Estação Total e GNSS RTK. Conforme NBR 13.133 levantamentos planialtimétrico classe IIPAC, escala para detalhamento 1:500 com curvas de nível com equidistância são necessários 60 pontos por ha.

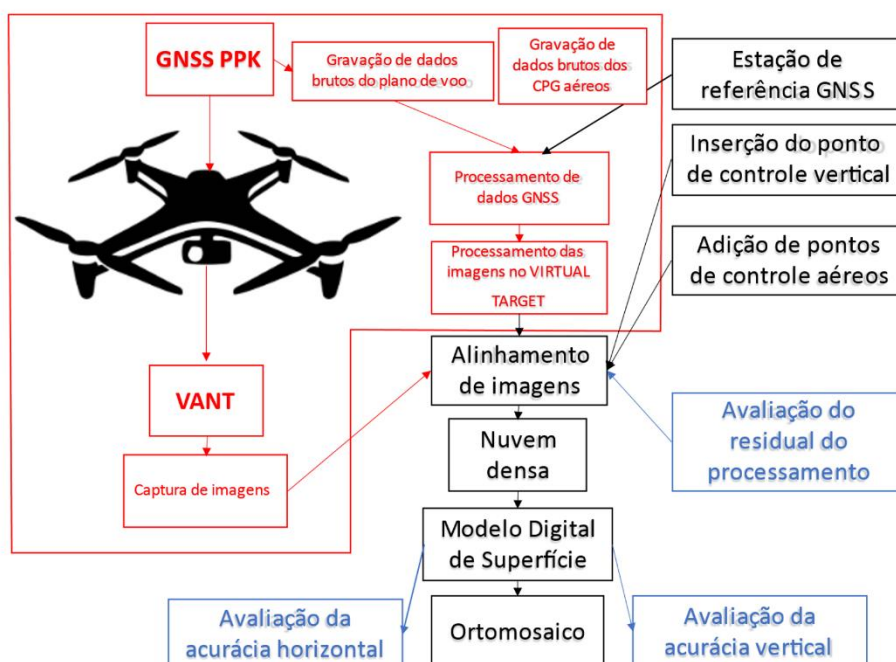
### **CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA**

A busca por soluções de baixo custo para detectar com precisão as posições dos sensores embarcados em VANT's multirotores apresenta alguns desafios. O principal deles está ligado à necessidade do perfeito sincronismo entre o exato momento da tomada da imagem com o registro da posição do receptor GNSS

embarcado, solução esta desenvolvida e apresentada nos kits PPKs. A proposta de solução de baixo custo está baseada na utilização de receptores capazes de armazenar as observações da portadora da fase. Neste caso, será desenvolvido um sistema composto de antena, alimentação e receptor GNSS capaz de ser acoplado com facilidade em qualquer VANT multirotor. A grande vantagem do sistema proposto nesta pesquisa, comparado aos que são comercializados, é que não necessita de um sensor fotoelétrico conectado à câmera e ao receptor GNSS, possibilitando assim o embarque e aplicação da metodologia em qualquer modelo de multirotor.

O método de posicionamento utilizado será relativo cinemático, aplicado em levantamentos topográficos que tem como observável básica a onda portadora que consiste em determinar um conjunto de coordenadas para cada instante de observação coletada, garantindo rapidamente o vetor de ambiguidade e atingindo, desta forma, precisão milimétrica durante todo voo de acordo com o modelo do receptor. A abordagem metodológica adotada neste experimento está sumarizada no fluxograma da Figura 19. Em vermelho está apresentada a proposta de instalação de sensor de posicionamento no VANT, em preto a parte de processamento e coleta de dados durante o voo para conferir precisão ao levantamento e em azul as etapas de análise e validação de precisão da técnica proposta.

Figura 19 - Fluxograma das etapas processo de desenvolvimento do sistema



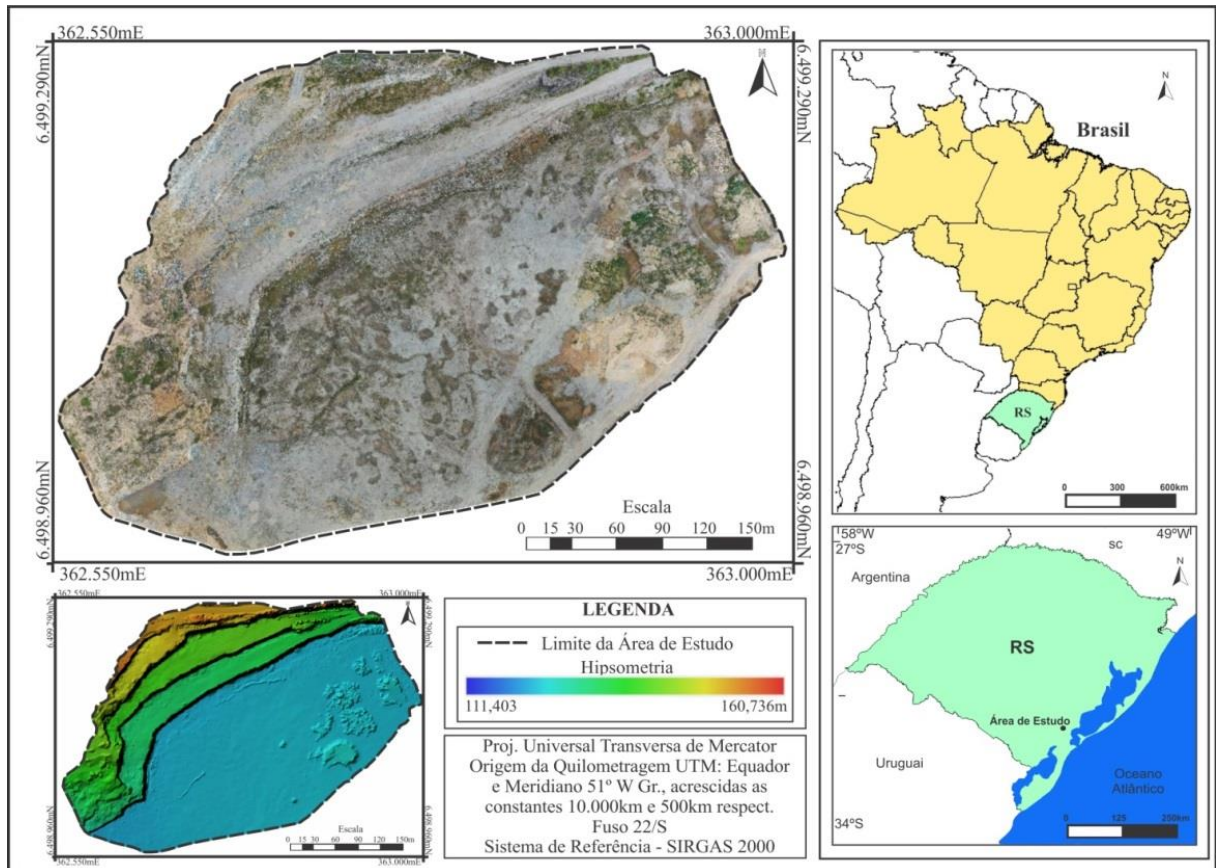
Fonte: O autor (2021)

### 3.1 Local do experimento

A área de estudo foi escolhida por apresentar variações de elevação no relevo, taludes e rampas, além da ausência de vegetação, garantindo assim, a análise de geometrias e condições topográficas diversas. Trata-se de uma jazida de agregados para concreto e pavimentação de rodovias, a qual produz brita de diferentes granulometrias a partir de rochas graníticas.

A jazida está localizada no sul do Brasil, no município de Pelotas/RS, em uma região conhecida como Monte Bonito – 9º distrito (Figura 20). Apresenta cerca de 10 hectares, com as coordenadas geocêntricas da jazida 362.775mE e 6.499.125mN da zona 22S/UTM em SIRGAS2000. O ortomosaico gerado no *MetaShape* possui um GSD de 2,59 cm. Já a amplitude altimétrica encontrada no modelo digital de superfície (MDS) foi de 49,333 metros, com altitude ortométrica mínima de 111,403m e máxima de 160,736m.

Figura 20 - Mapa de localização da área de estudo



Fonte: O autor (2021).

### 3.2 Veículo aéreo não tripulado

O RPA multirrotor de classe 3 utilizado neste projeto foi o *Mavic 2 Pro*, desenvolvido pelo fabricante DJI, com 35,4 cm de dimensões diagonais (exceto hélices), peso de 907 gramas e sensor com resolução máxima de 20 MPixels com distância focal equivalente a 35mm (Figura 21). Com o intuito de controlar os parâmetros do aerolevanteamento, foi criado um plano de voo através do programa *DroneDeploy*. Este software consegue simplificar ao máximo os parâmetros determinantes para a obtenção de resultados fotogramétricos, como sobreposição, velocidade, ângulo da câmera e altura do voo definidor do GSD do trabalho.

Figura 21 - VANT multirrotor utilizada na pesquisa





Fonte: O autor

As descrições das características do equipamento e do plano de voo constam na Tabela 10. Para a realização do levantamento, foi realizado um planejamento, onde se considerou a hora com a menor inclinação solar, visando minimizar o efeito da sombra nas imagens, executando o voo aproximadamente às 11 horas e 30 minutos.

Tabela 10 - Características do VANT e do plano de voo utilizado no aerolevamento.

<b>Características do equipamento</b>	<b>Características do plano de voo</b>
Peso em ordem de voo: 907 gramas	Altitude de voo: 80 metros
Autonomia de voo: 31 minutos	Sobreposição lateral das faixas: 60%
Distância máxima de alcance do rádio transmissor: 10 km	Sobreposição frontal das fotos: 70%
Bateria: LiPo4s de 3850 mAh	Azimute de voo: 8°
Câmera: Sensor CMOS de 20 Mega pixels	Velocidade máxima: 10 m/s
Dimensão máxima de cada foto: 5472 x 3648 pixels	Visada da câmera: Nadir
Velocidade do obturador: 8-1/8.000s	Resolução espacial: 2,59 cm/pixel
Campo de visão da câmera: 77°	Tempo de voo: 13 minutos e 39 segundos
Posicionamento Espacial: GPS + GLONASS	Número de imagens: 265

Fonte: O autor (2021)

### 3.3 Receptor GNSS, Antena e Suporte.

Nesta etapa foi avaliada a capacidade de integração entre diferentes componentes (aeronave, antena, suporte, receptor, fonte), buscando efetividade na comunicação entre eles, além do peso adicionado e das dimensões por questões de autonomia e aerodinâmica. A escolha do receptor GNSS para embarcar no experimento levou em consideração dois aspectos, suas dimensões (56,4 x 45,3 x 14,6mm) e peso (20 g), devido o VANT ser de pequeno porte, optando pelo receptor

do fabricante EMLID, modelo REACH M2, que garante precisão horizontal e vertical cinemática respectivamente de  $\pm 4\text{mm} + 0,5 \text{ ppm}$  e  $\pm 8\text{mm} + 1\text{ppm}$  pós processados (Figura 22).

Algumas das vantagens de desenvolver um trabalho com este modelo de receptor estão baseadas na facilidade de encontrá-lo no mercado nacional, além de possuir uma programação amigável via Wi-Fi/Bluetooth em plataforma disponível para os sistemas operacionais Androide e IOS potencializando configurações avançadas de registro de gravação de observáveis GNSS, máscara de gravação e variados formatos de exportação de dados. Com baixo consumo de energia de apenas 200mA e tensão de entrada na faixa de 4,75 – 5,5V, a bateria utilizada foi a de 1100mAh de Lithium -polímero recarregável. Dimensões físicas de 140mm x 30mm x 7,5mm e peso 33 gramas. (Figura 23)

Figura 22 - Bateria para alimentar o receptor GNSS EMLID Reach M2



Fonte: Fabricante Syma

Figura 23 - Receptor GNSS EMLID Reach M2

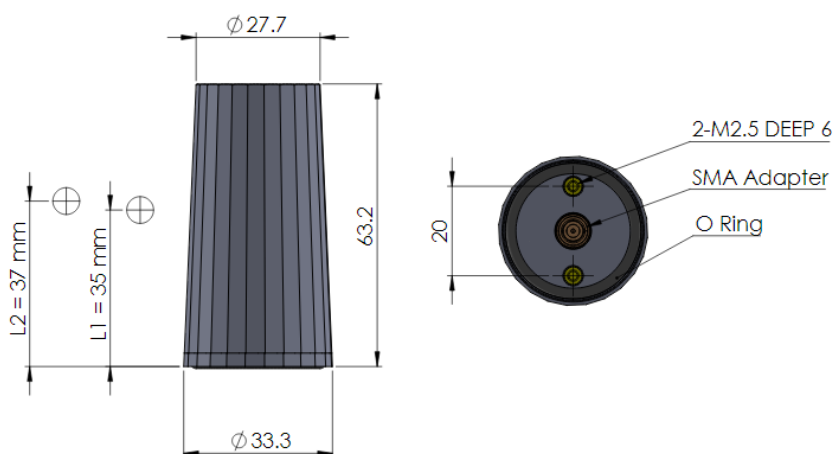


Fonte: [www.emlid.com](http://www.emlid.com)

Sua capacidade de rastreamento de sinais das constelações GPS, GLONASS, BeiDou e Galileo nas frequências observáveis L1/L2, agiliza a resolução da ambiguidade, garantindo solução fixa nos registros do início ao fim do levantamento dos pontos de controles aéreos (PCAs). Outra característica do receptor está ligada ao intervalo de registro de observações superior a cinco segundos e capacidade de armazenamento de dados brutos, sendo estes convertidos posteriormente para o formato RINEX.

A antena GNSS utilizada foi a modelo HC871 da fabricante Tallysman, especialmente pelo fato de ser leve e compacta. Suas dimensões são mostradas na (Figura 24) e seu peso é de aproximadamente 29 g. Além desses relevantes fatores, também se levou em conta o fato desta antena não necessitar um plano de solo (também conhecido como plano-terra), a facilidade da conexão (SMA), o fato de rastrear todas as constelações GNSS, baixo custo de aquisição e facilidade de reposição, o que reforça sua atratividade do ponto de vista operacional, sendo adequada para as soluções propostas no presente trabalho.

Figura 24 - Dimensões da antena Tallysman, modelo HC871



Fonte: [www.tallysman.com](http://www.tallysman.com)

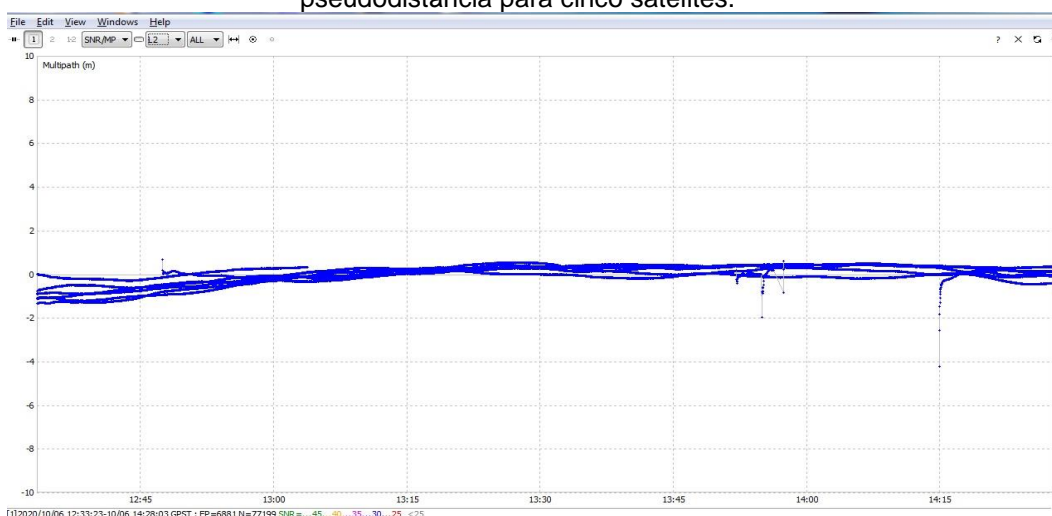
A antena Tallysman HC871 também apresenta interessantes características técnicas, dentre as quais podem ser citadas:

- Alto ganho de amplificação (28 dB);
- Excelente recepção de sinal polarizado circular;
- Capacidade de rejeição ao multicaminho nos sinais GNSS;

- Excelente relação sinal/ruído em relação a outras antenas do mercado;  
Polarização circular para direita (RHCP – *Right-Hand Circular Polarized*).

Segundo FARRET (2007), o multicaminho é o fenômeno pelo qual o sinal que chega à antena do receptor GNSS é resultado não só do sinal vindo diretamente do satélite, mas também de sinais secundários, provenientes da reflexão do sinal direto em objetos próximos da antena, ou da linha receptor-satélite. Segundo este autor, o multicaminho distorce a função de correlação entre o sinal oriundo do satélite e a réplica dele gerada internamente no receptor. Essa distorção causa erro na medida da distância receptor-satélite com consequentes erros nos valores de coordenadas estimadas a partir dessa medida. As soluções baseadas em antena para atenuar o erro devido ao multicaminho são interessantes por não afetarem a operacionalidade do equipamento. Daí a importância da antena Tallysman HC871 apresentar essa interessante capacidade. Ela se deve exatamente à característica da polarização circular para direita (RHCP – *Right-Hand Circular Polarized*). Este sentido de polarização é o mesmo do sinal direto, o que faz com que a antena consiga rejeitar sinais com polarização contrária (LHCP – *Left-Hand Circular Polarized*), que é o caso do multicaminho e outros sinais interferentes (ruídos em geral). A Figura 25 mostra o desempenho desta antena na detecção do efeito do multicaminho nas medidas de pseudodistância para cinco satélites em intervalo de tempo de aproximadamente duas horas. Pode-se observar que não há presença de multicaminho, pois as observações GNSS no período oscilaram de 0 à 2 metros.

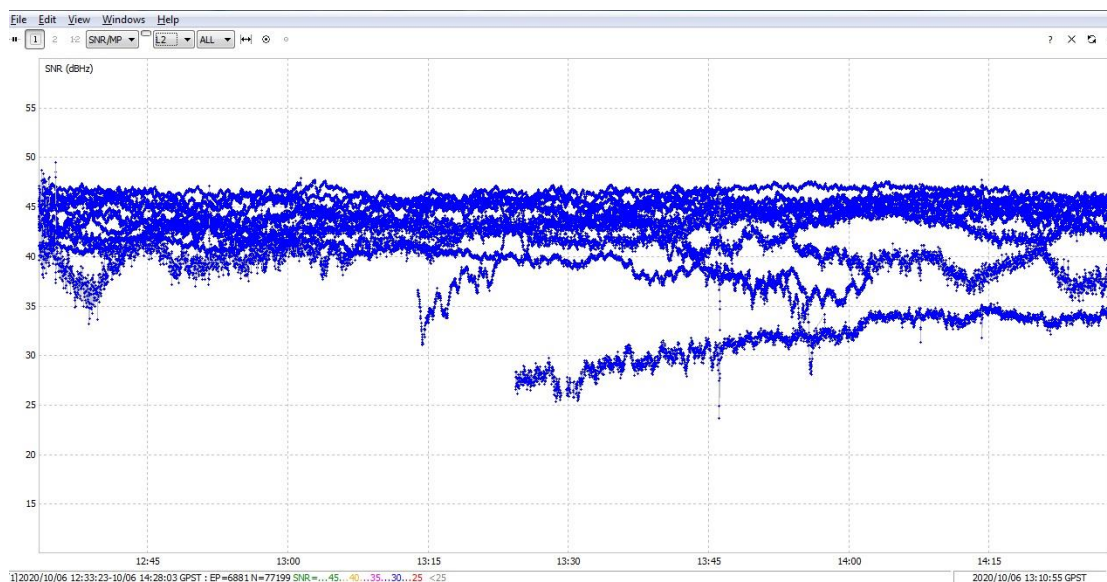
Figura 25 - Desempenho da antena na detecção do efeito do multicaminho nas medidas de pseudodistância para cinco satélites.



Fonte: O autor

Parte da preocupação do sistema desenvolvido está relacionada à recepção do sinal, procurando-se manter a sua precisão e a integridade. Isso se reflete no cuidado em relação ao posicionamento da fixação da antena sobre aeronave, havendo o risco de o sinal de recepção ser afetado diretamente por campos magnéticos gerados, por exemplo, pelos rotores do VANT. Grande parte disso também se deve exatamente ao fato desta antena possuir polarização circular para direita (BRAASH, 1996). Como visto acima, ao rejeitar ruídos (os quais possuem polarização contrária), esta antena favorece o aumento, com a consequente estabilização, da relação sinal/ruído. Um estudo prévio da antena Tallysman HC871 mostrou que a sua relação sinal/ruído se mantém praticamente constante em relação a este fator (variações de posição). A Figura 26 mostra a relação sinal/ruído para diferentes satélites em um intervalo de tempo de aproximadamente duas horas. Nela pode-se observar que quase todos os satélites conseguem manter constância nos valores desta grandeza.

Figura 26 - Relação sinal/ruído para diferentes satélites



Fonte: O autor (2021)

O suporte com dimensões para fixação do receptor e da antena, foi confeccionado em impressora 3D conforme projeto apresentado na Figura 27.

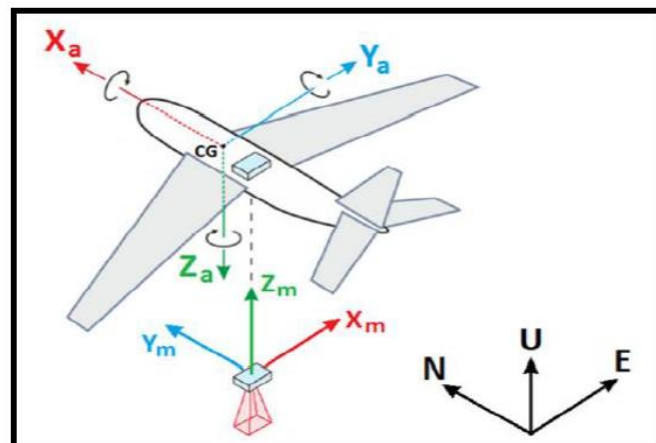
Figura 27 - Suporte de fixação do receptor e da antena.



Fonte: O autor (2021).

Nesta etapa foram medidos os parâmetros de offset (Delta X, Y e Z) da antena para o sensor do multirrotor DJI MAVIC PRO2. Esta informação é fundamental para que as coordenadas corrigidas sejam inseridas no pp (ponto principal) da imagem. A Figura 28 apresenta esquema de offset da antena em relação ao sistema fotogramétrico do VANT demonstrando possíveis deslocamentos entre o pp e o centro de fase da antena nos três eixos (Y/N – Z/U – X/E).

Figura 28 - Sistema fotogramétrico e offset da antena em relação ao ENU.



Fonte: O autor

### 3.4 Procedimento de coleta de dados em campo

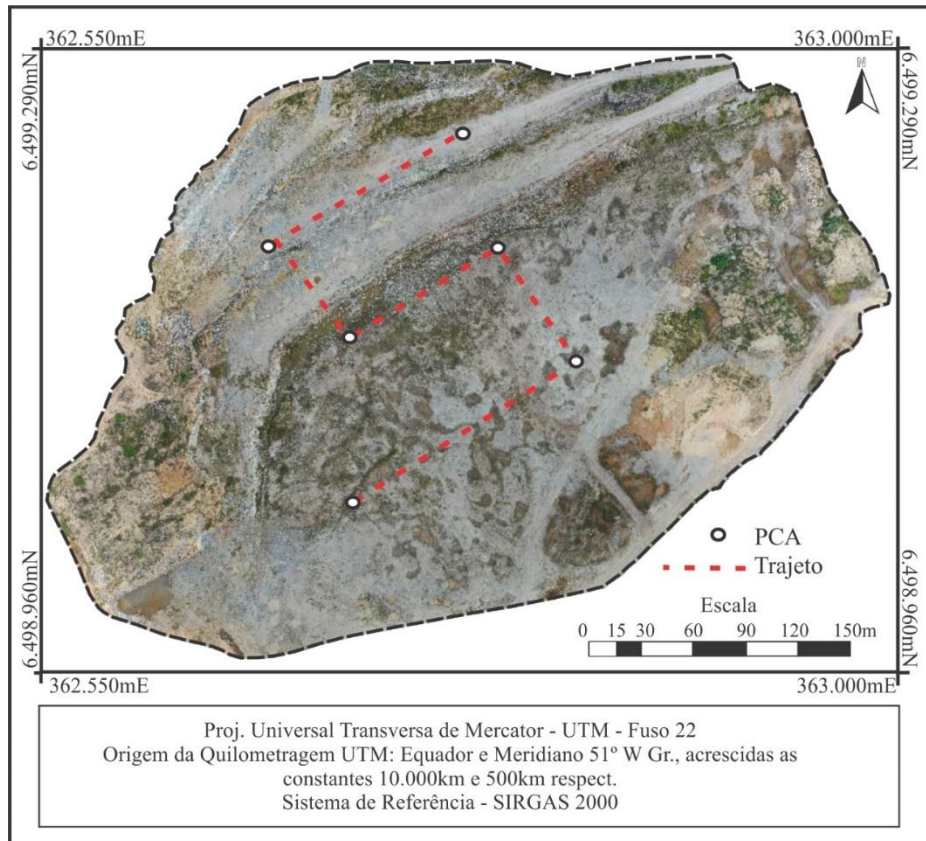
A fase de coleta de dados empregada nesta pesquisa, iniciou-se com o planejamento, delimitando a área de estudo e a definição dos números de faixas de recobrimento. A segunda etapa está relacionada à coleta de dados GNSS, pois a técnica *PPK* necessita de um receptor GNSS em solo como referência, onde a mesma deverá ser instalada cuidadosamente, visando o mínimo de obstruções e do efeito de multicaminho. Para levantamento das coordenadas, utilizou-se como estação base um receptor GNSS da marca EMLID, modelo Reach RS2, bandas L1/L2 e multiconstelação GNSS (GPS, GLONASS, BeiDou e GALILEO).

No levantamento, primeiramente a base GNSS foi montada e configurada para o registro dos dados brutos no formato UBX, com uma taxa de gravação de 5 segundos. O equipamento permaneceu no modo estático por um período de aproximadamente 3 horas de rastreamento contínuo.

Consequente, foi inicializado o receptor móvel embarcado no VANT, sendo configurado para uma taxa de gravação de 5 segundos e tendo como observáveis todas as constelações conforme estação de referência. Neste momento, é fundamental deixar a aeronave em repouso por aproximadamente 5 minutos, para resolução das ambiguidades pelo receptor GNSS.

A partir desta configuração, e executado por completo o plano de voo da área de interesse e logo após o término da mesma a aeronave é deslocada para os pontos de interesse aéreos, denominados nesta pesquisa de PCAs (Pontos de Controle Aéreo) onde a captura das imagens é realizada de forma manual, com disparos da câmera através do controle do operador em solo (Figura 29). A relação tempo de permanência/captura de imagens dependerá do intervalo de gravação das observações GNSS, neste trabalho identificamos que o ideal deve ser acima de 5 segundos devido ao deslocamento da aeronave para que as observações fiquem com equidistância maior.

Figura 29 - Localização dos PCAs



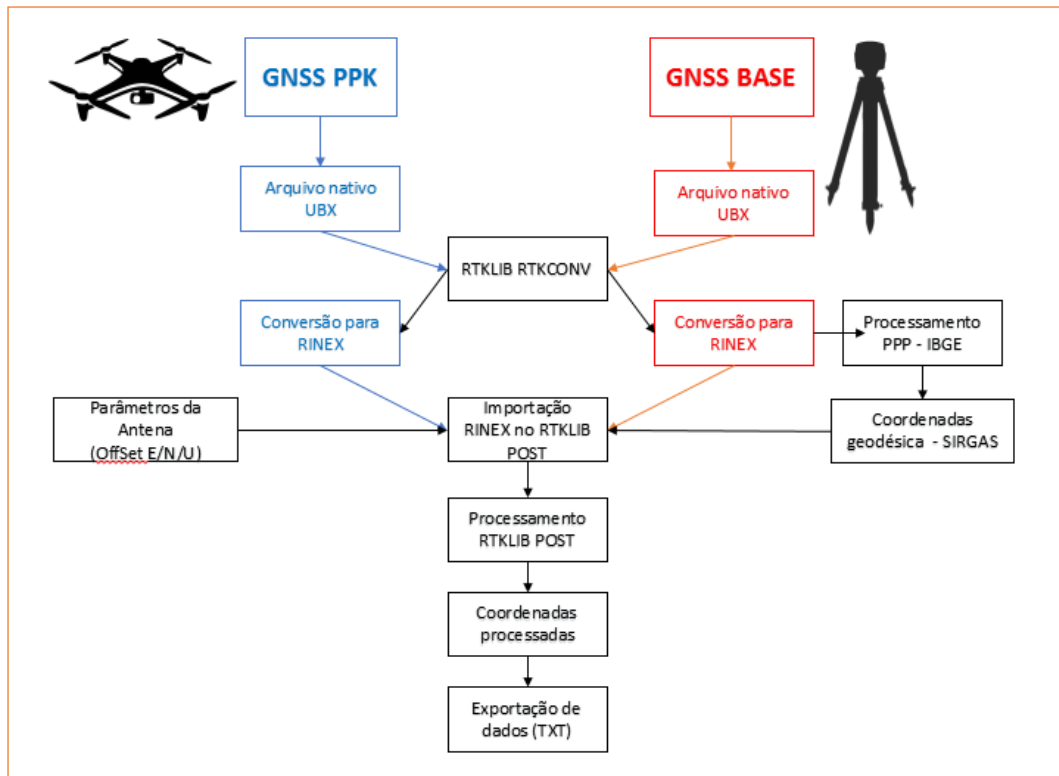
Fonte: O autor

### 3.5 Processamento de dados GNSS

Após a execução do plano de voo e ocupação dos PCAs, inicia-se o processamento dos dados conforme Figura 30. Com os arquivos nativos da base e móvel na extensão *UBX*, inicia-se a conversão dos mesmos para extensão *Receiver Independent Exchange Format (RINEX)*. Este formato de intercâmbio de dados permite ao usuário pós-processar os dados em softwares livres (*open source*). A transformação dos arquivos do formato *UBX* para o formato *RINEX* foi realizada no aplicativo *Open source RTKLIB RTKCONV* (Figura 31), sendo inicialmente configurado através da aba "*Options*" a versão do *RINEX* "3.03", podendo identificar o "*Stations ID*" e marcar *RINEX name*, ou seja, Identificação do ponto e selecionar as observações de acordo com o modelo do receptor GNSS que neste caso "*Frequencies*" deverão ser marcadas *L1/L2/L5* conforme (Figura 32).

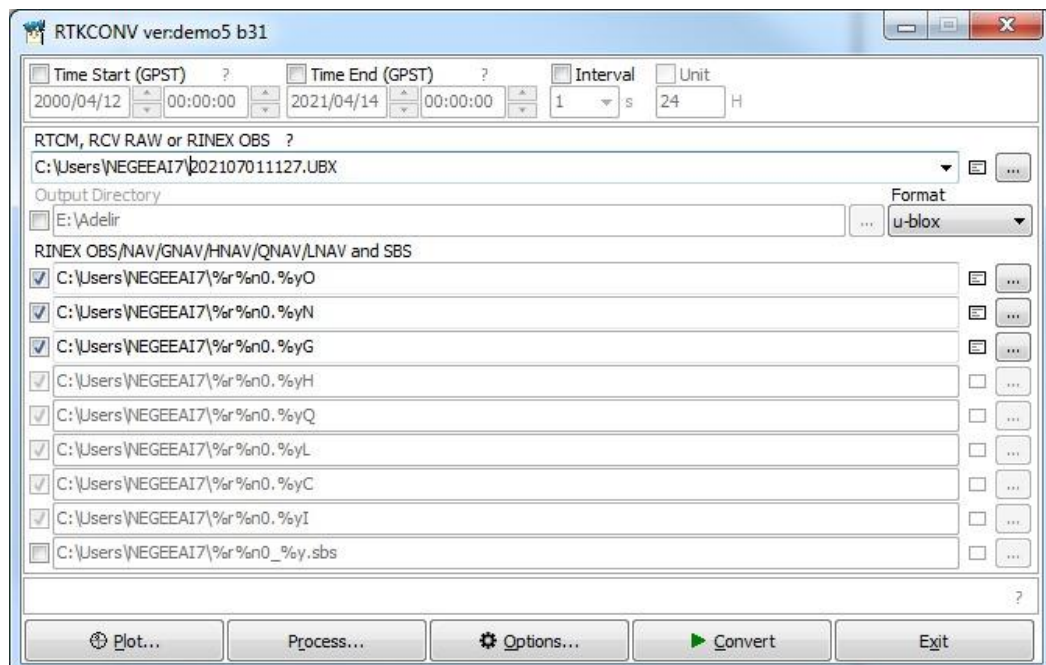
Figura 30 - Fluxograma de processamento de dados GNSS



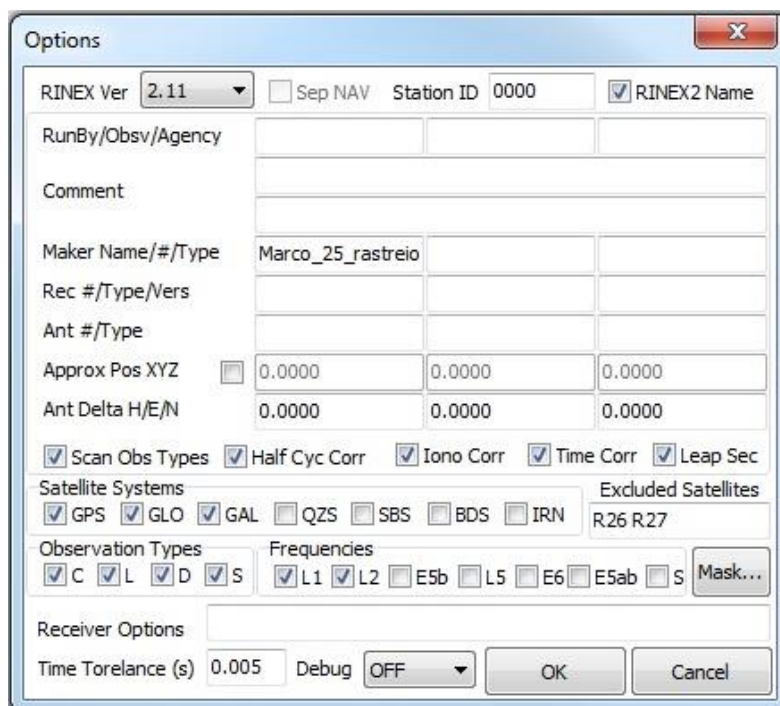


Fonte: O autor (2021)

Figura 31 - Tela do aplicativo *RTKLIB RTKCONV*



Fonte: O autor

Figura 32 - Tela do aplicativo *RTKLIB RTKCONV* – Options

Fonte: O autor

A primeira etapa do processamento está diretamente ligada ao ponto de apoio da base de referência, sendo esta pelo método PPP-IBGE. Optou-se na utilização deste método de processamento devido a facilidade em obter uma coordenadas acurada. A coordenada que foi utilizada está destacada no relatório na Figura 33 para época 2000.4 e, conseqüentemente para o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).

Figura 33 - Relatório de processamento do ponto de apoio processado no PPP-IBGE

Sumário do Processamento do marco: Base Silveira						
Início:AAAA/MM/DD HH:MM:SS.SS	2021/05/08 10:47:17,00					
Fim:AAAA/MM/DD HH:MM:SS.SS	2021/05/08 13:10:44,00					
Modo de Operação do Usuário:	ESTÁTICO					
Observação processada:	CÓDIGO & FASE					
Modelo da Antena:	EML_REACH_RS2 NONE					
Órbitas dos satélites: <sup>1</sup>	FINAL					
Frequência processada:	L3					
Intervalo do processamento(s):	1,00					
Sigma <sup>2</sup> da pseudodistância(m):	5,000					
Sigma da portadora(m):	0,010					
Altura da Antena <sup>3</sup> (m):	2,000					
Ângulo de Elevação(graus):	10,000					
Resíduos da pseudodistância(m):	1,10 GPS 1,44 GLONASS					
Resíduos da fase da portadora(cm):	1,07 GPS 1,09 GLONASS					

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) <sup>4</sup>	-31° 38' 01,8282"	-52° 26' 50,1704"	140,44	6499239.794	362750.571	-51
Na data do levantamento <sup>5</sup>	-31° 38' 01,8201"	-52° 26' 50,1716"	140,44	6499240.043	362750.536	-51
Sigma(95%) <sup>6</sup> (m)	0,002	0,009	0,009			
Modelo Geoidal	MAPGEO2015					
Ondulação Geoidal (m)	9,42					
Altitude Ortométrica (m)	131,02					

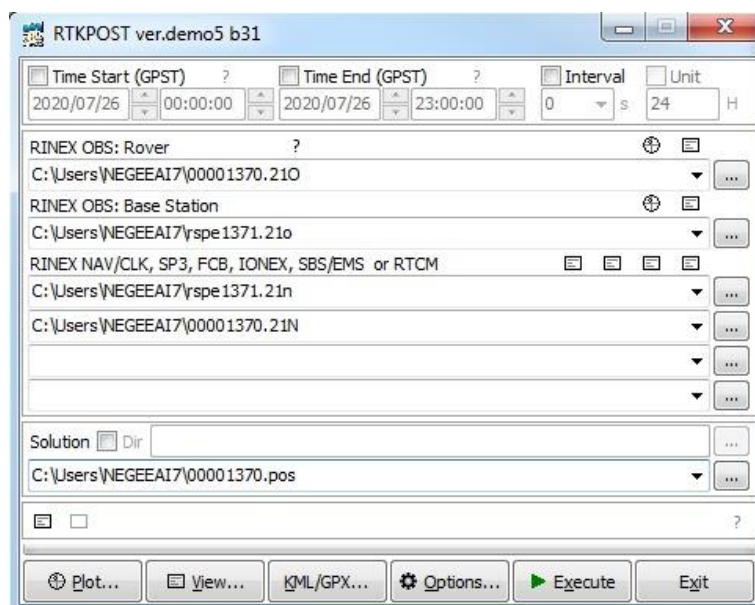
Fonte: PPP-IBGE (2021)

Em seguida, inicia-se a etapa de processamento do arquivo do receptor embarcado na aeronave, através da técnica de processamento por posicionamento relativo cinemático. Para tanto, utilizam-se as Duplas Diferenças (DD) como observáveis fundamentais e dois ou mais receptores envolvidos rastreiam, simultaneamente, pelo menos dois satélites em comum (COLLISCHONN; MATSUOKA, 2016). Nessa técnica, são estimadas as posições da linha-base ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  e  $\Delta Z$ ) entre duas ou mais ocupações. Durante o processo, as componentes que fazem parte da linha-base são estimadas e, ao acrescentar-se às coordenadas do ponto base, também chamado de referência, pois possui coordenada conhecida, geram as coordenadas da estação desejada (MONICO, 2008).

Para o processamento por posicionamento relativo, utilizou-se o pacote de programas de código aberto RTKPOST versão 2.4.3 (Figura 34) importando os dados brutos da base. Em seguida deve-se configurar a opções de processamento inserindo as coordenadas geodésicas (graus decimais) conhecidas do ponto base e, por fim, importado o arquivo de observáveis do receptor móvel embarcado no VANT.

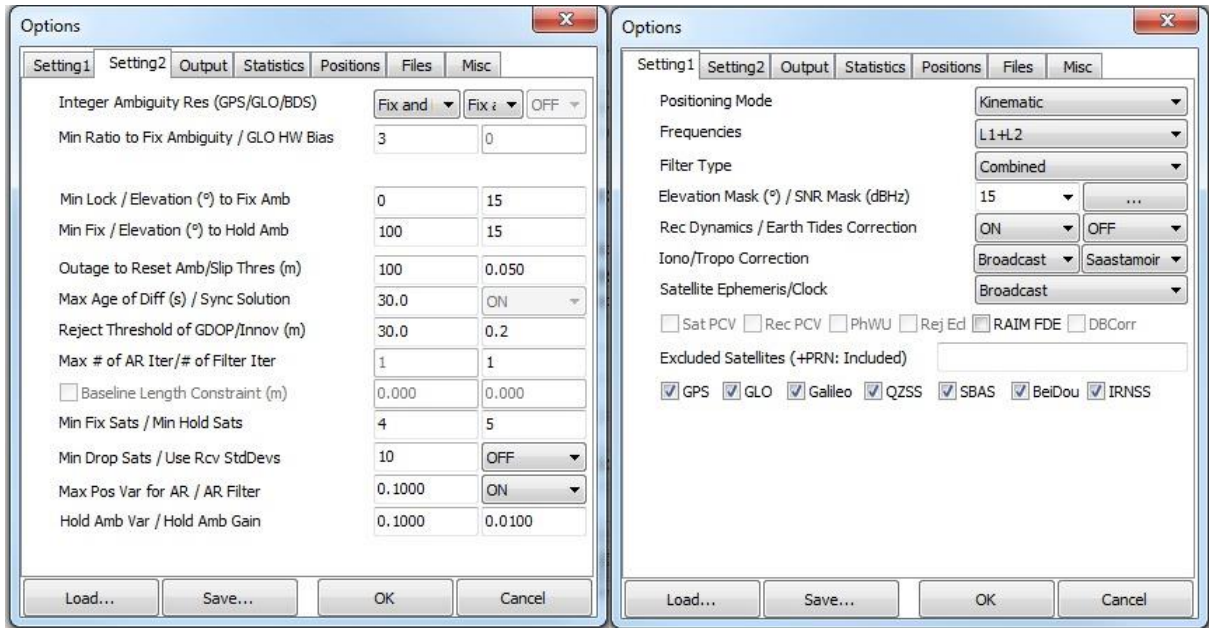
Antes de iniciar o processamento é necessário realizar alguns ajustes de processamento, como segue abaixo nas telas de configurações avançadas, citadas por FARRET (2007) como itens “*Positioning Mode*” que deverá ser selecionado a opção “*Kinematic*”. (Figura 35).

Figura 34 - Tela do *Software RTKPOST*



Fonte: O autor (2021)

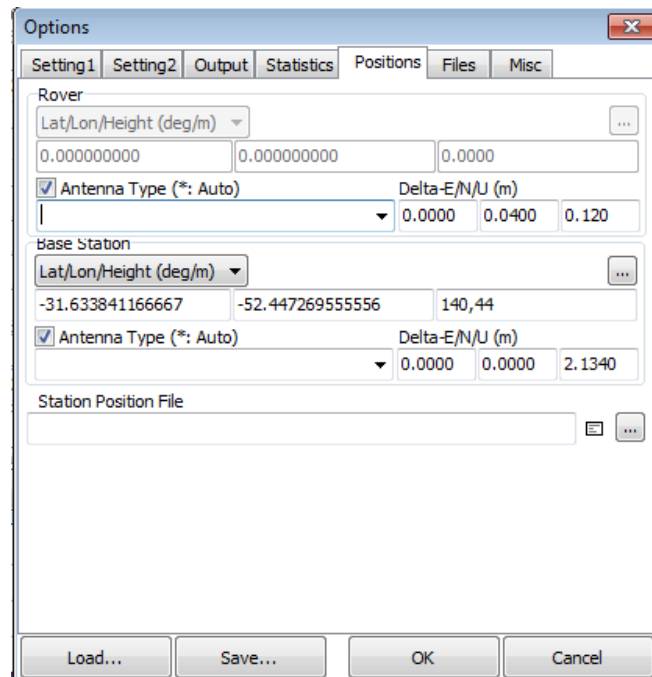
Figura 35 - Configuração de processamento



Fonte: O autor (2021)

Na guia “*Positions*”, devem ser inseridas as coordenadas da base e a distância entre a antena Tallysman e o sensor da câmera, conhecido como offset da antena conforme Figura 36.

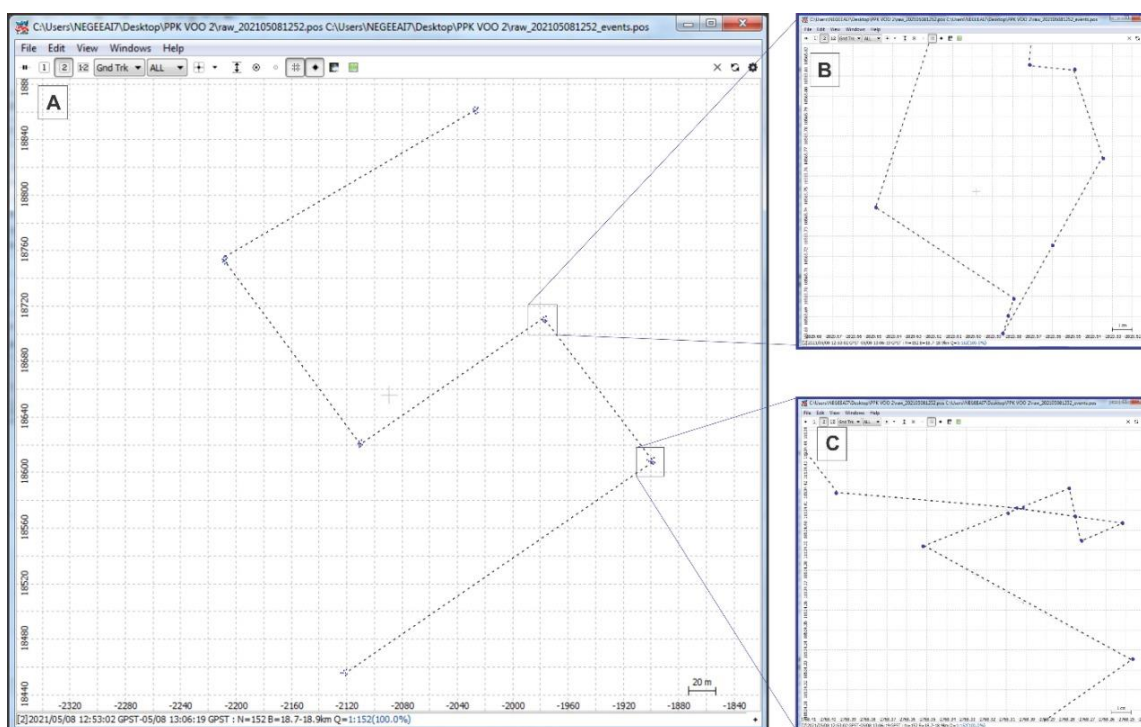
Figura 36 - Inserção do offset da antena e da posição da base



Fonte: O autor (2021).

Ao aplicar o Método dos Mínimos Quadrados - MMQ, o programa auxiliar RTKPOST do pacote RTKLIB, para a obtenção das coordenadas e precisões das posições desconhecidas, gera um arquivo gráfico com a marcação das posições (ZHANG et al., 2019). No processamento no RTKPOST, todas as coordenadas foram corrigidas, resultando em solução fixa, ou seja, as ambiguidades foram resolvidas. Na Figura 37(A) é possível observar os 6 PCAs onde foram coletadas as posições juntamente com as imagens e na figura 37 B e C as regiões de influência de cada ponto de controle apresentadas com 1cm de tamanho de quadricula.

Figura 37 - (A) Localização dos PCAs , (B) observações coletadas do PCA 4 e (C) observações coletadas do PCA 5.



Fonte: O autor (2021)

Neste experimento todas as marcações apresentaram soluções fixas, ou seja, as ambiguidades dos sinais foram resolvidas, apresentando precisão na ordem de 5 mm na horizontal e 10 mm na vertical. Isso mostrará que o receptor GNSS da aeronave foi inicializado de forma correta.

### 3.6 Exportação de dados processados

Após processamento, o arquivo será exportado em formato de texto contando as colunas de latitude, longitude e altura chamando de *geotagging* (Figura 38).

Figura 38 - Arquivo processado no RTK

```

raw_202105081252 (1) - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
% program : RTKPOST-QT ver.2.4.3 Emliid b33
% inp file : D:\AEROLEVANTAMENTO MARCIANO SILVEIRA 08052021\VOO 02\PPK VOO 2\raw_202105081252.obs
% inp file : D:\AEROLEVANTAMENTO MARCIANO SILVEIRA 08052021\DADOS DA BASE\RTNEX_BASE\raw_202105081252-rec.obs
% inp file : D:\AEROLEVANTAMENTO MARCIANO SILVEIRA 08052021\VOO 02\PPK VOO 2\raw_202105081252.nav
% obs start : 2021/05/08 12:52:25.8 GPST (week2156 564745.8s)
% obs end : 2021/05/08 13:08:23.0 GPST (week2156 565703.0s)
% ref pos : -31.633041305 -52.447269055 142.5698
%
% (lat/lon/height=WGS84/ellipsoidal,Q=1:fix,2:float,3:sbas,4:dgps,5:single,6:ppp,ns=# of satellites)
% GPST latitude(deg) longitude(deg) height(m) Q ns sdn(m) sde(m) sdu(m) sdoe(m) sdeu(m) sduo(m) age(s) ratio
2021/05/08 12:52:25.000 -31.633774089 -52.447080053 141.2645 2 12 0.5908 0.5474 2.5334 -0.0495 0.5426 -0.4001 0.79 0.0
2021/05/08 12:52:26.000 -31.633775034 -52.447080019 141.2370 2 12 0.4215 0.3915 1.8291 -0.0321 0.3852 -0.2933 -0.01 0.0
2021/05/08 12:52:26.200 -31.633775083 -52.447080064 141.1545 2 12 0.3452 0.3209 1.5041 -0.0253 0.3149 -0.2408 0.19 0.0
2021/05/08 12:52:26.400 -31.633775148 -52.447080055 141.0951 2 12 0.2994 0.2785 1.3073 -0.0215 0.2729 -0.2091 0.39 0.0
2021/05/08 12:52:26.600 -31.633775217 -52.447080051 141.0673 2 12 0.2650 0.2494 1.1717 -0.0190 0.2441 -0.1873 0.59 0.0
2021/05/08 12:52:26.800 -31.633775259 -52.447080014 141.0263 2 12 0.2448 0.2278 1.0711 -0.0172 0.2229 -0.1712 0.79 0.0
2021/05/08 12:52:27.000 -31.633775408 -52.447079952 141.0210 2 12 0.2267 0.2111 0.9925 -0.0158 0.2064 -0.1586 -0.01 0.0
2021/05/08 12:52:27.200 -31.633775440 -52.447079915 141.0105 2 12 0.2122 0.1975 0.9290 -0.0147 0.1931 -0.1484 0.19 0.0
2021/05/08 12:52:27.400 -31.633775487 -52.447079887 141.0211 2 12 0.2081 0.1863 0.8762 -0.0138 0.1820 -0.1399 0.39 0.0
2021/05/08 12:52:27.600 -31.633775460 -52.447079831 141.0124 2 12 0.1898 0.1768 0.8314 -0.0130 0.1727 -0.1327 0.59 0.0
2021/05/08 12:52:27.800 -31.633775447 -52.447079779 140.9946 2 12 0.1810 0.1686 0.7929 -0.0124 0.1646 -0.1265 0.79 0.0
2021/05/08 12:52:28.000 -31.633775480 -52.447079743 140.9663 2 12 0.1733 0.1615 0.7591 -0.0118 0.1576 -0.1211 -0.01 0.0
2021/05/08 12:52:28.200 -31.633775587 -52.447079702 140.9424 2 12 0.1656 0.1551 0.7293 -0.0113 0.1514 -0.1163 0.19 0.0
2021/05/08 12:52:28.400 -31.633775497 -52.447079644 140.9278 2 12 0.1605 0.1495 0.7027 -0.0108 0.1459 -0.1121 0.39 0.0
2021/05/08 12:52:28.600 -31.633775498 -52.447079580 140.9152 2 12 0.1551 0.1445 0.6788 -0.0104 0.1409 -0.1082 0.59 0.0
2021/05/08 12:52:28.800 -31.633775500 -52.447079557 140.8996 2 12 0.1502 0.1399 0.6571 -0.0100 0.1364 -0.1047 0.79 0.0
2021/05/08 12:52:29.000 -31.633775541 -52.447079493 140.8913 2 12 0.1457 0.1357 0.6373 -0.0097 0.1323 -0.1015 0.91 0.0
2021/05/08 12:52:29.200 -31.633775534 -52.447079482 140.8787 2 12 0.1416 0.1319 0.6192 -0.0094 0.1285 -0.0986 0.19 0.0
2021/05/08 12:52:29.400 -31.633775595 -52.447079468 140.8626 2 12 0.1378 0.1284 0.6024 -0.0091 0.1250 -0.0959 0.39 0.0
2021/05/08 12:52:29.600 -31.633775514 -52.447079440 140.8687 2 12 0.1343 0.1252 0.5869 -0.0088 0.1218 -0.0934 0.59 0.0
2021/05/08 12:52:29.800 -31.633775523 -52.447079432 140.8493 2 12 0.1311 0.1222 0.5726 -0.0086 0.1180 -0.0911 0.79 0.0
2021/05/08 12:52:30.000 -31.633775545 -52.447079411 140.8376 2 12 0.1281 0.1194 0.5591 -0.0083 0.1160 -0.0889 0.01 0.0
2021/05/08 12:52:30.200 -31.633775562 -52.447079393 140.8215 2 12 0.1252 0.1167 0.5466 -0.0081 0.1134 -0.0869 0.19 0.0
2021/05/08 12:52:30.400 -31.633775572 -52.447079358 140.7981 2 12 0.1226 0.1143 0.5348 -0.0079 0.1110 -0.0850 0.39 0.0
2021/05/08 12:52:30.600 -31.633775584 -52.447079362 140.7696 2 12 0.1201 0.1120 0.5237 -0.0077 0.1087 -0.0832 0.59 0.0
2021/05/08 12:52:30.800 -31.633775155 -52.447081131 140.8897 1 12 0.0043 0.0040 0.0149 -0.0005 0.0036 0.0005 0.79 10.5
2021/05/08 12:52:31.000 -31.633773140 -52.447081150 140.8876 1 12 0.0043 0.0040 0.0147 -0.0005 0.0035 0.0006 -0.01 10.3
2021/05/08 12:52:31.200 -31.633773121 -52.447081146 140.8814 1 12 0.0043 0.0040 0.0147 -0.0005 0.0035 0.0005 0.19 10.0
2021/05/08 12:52:31.400 -31.633773124 -52.447081147 140.8803 1 12 0.0043 0.0040 0.0148 -0.0005 0.0035 0.0005 0.39 10.0
2021/05/08 12:52:31.600 -31.633773123 -52.447081151 140.8795 1 12 0.0043 0.0040 0.0148 -0.0005 0.0036 0.0005 0.59 9.7
2021/05/08 12:52:31.800 -31.633773117 -52.447081130 140.8850 1 12 0.0043 0.0040 0.0148 -0.0005 0.0036 0.0004 0.79 9.6
2021/05/08 12:52:32.000 -31.633773135 -52.447081136 140.8899 1 12 0.0043 0.0040 0.0147 -0.0005 0.0035 0.0005 -0.01 9.6
2021/05/08 12:52:32.200 -31.633773141 -52.447081153 140.8880 1 12 0.0043 0.0040 0.0147 -0.0005 0.0035 0.0005 0.19 9.4

```

Fonte: O autor (2021)

### 3.7 Software Virtual Target (SVT)

O *software Virtual Target* foi desenvolvido para rodar na plataforma *Windows* para inserir alvos artificiais em forma de cruzeta nas seguintes dimensões, 1,00 m x 1,00 m x 0,20 m conforme a resolução e o tamanho do pixel da imagem e serão utilizadas como PCAs utilizado as bibliotecas descritas na tabela 10 e *script* no Anexo I. Estes alvos serão identificáveis nas fotos durante o processamento das imagens. O programa foi desenvolvido em Python que é uma linguagem de programação de alto nível. Possui um modelo de desenvolvimento colaborativo e gerenciado pela organização sem fins lucrativos *Python Software Foundation*. Combina uma sintaxe concisa e clara com os recursos poderosos de sua biblioteca padrão e por módulos e *frameworks* desenvolvidos por terceiros (SEVERANCE, 2009; MATTHES, 2017; PYTHON, 2019).

Tabela 11 - Bibliotecas utilizadas no *software SVT*

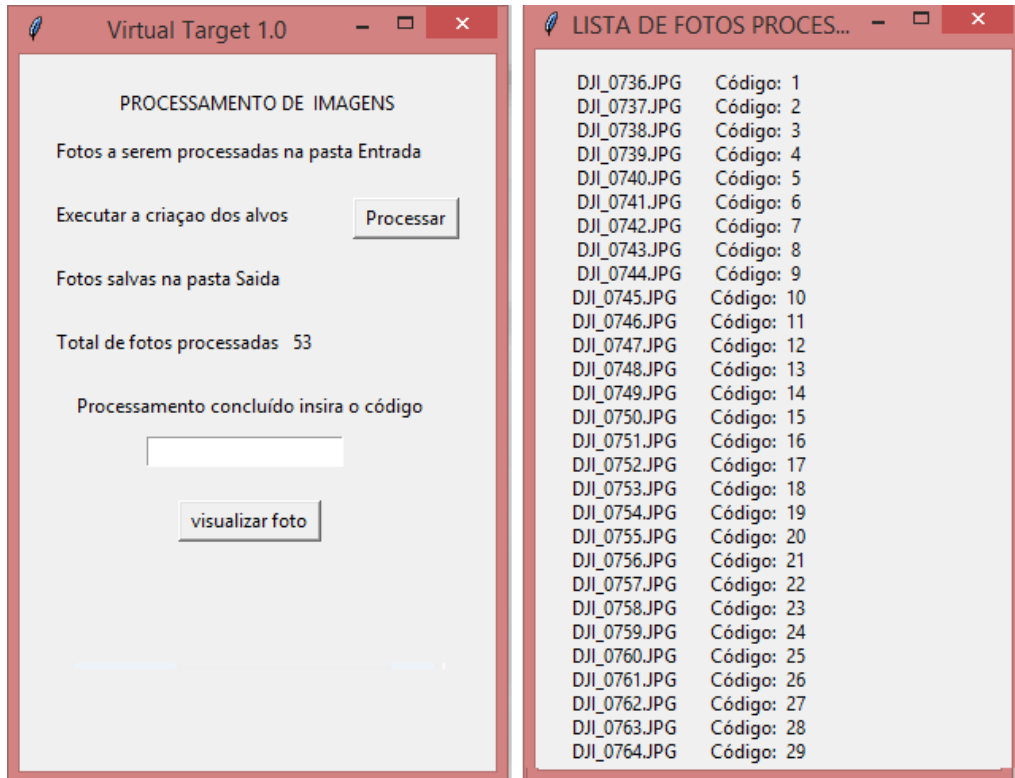
Nome da biblioteca	Conceito de uso
IO DO SKIMAGE	Biblioteca de leitura e gravação de dados com imagens.

TKINTER	É uma das bibliotecas que faz a interface gráfica do Python.
PIL	Biblioteca de imagens que expõe muitas funções para manipular imagens a partir de um script Python, aqui também usada para leitura e gravação de arquivos, imagens.
PYLAB	É um módulo com semelhança ao Matlab, importando funções dos módulos Numpy e Matplotlib. O Numpy fornece cálculos vetoriais numéricos eficientes com base nas bibliotecas binárias Fortran e C subjacentes. Matplotlib contém funções para criar visualizações de dados.
MATPLOTLIB	Biblioteca para a plotagem das imagens, leitura e gravação.
OS	Biblioteca que manipula o sistema operacional indicando localizações, caminhos para leitura e gravação de dados entre outros.

Fonte: O Autor (2021)

O layout apresentado é simples e intuitivo, conforme pode ser observado na Figura 39. Nesta etapa, as imagens que foram coletadas a campo e que serão utilizadas para conter os PCAs, deverão estar dentro de uma pasta específica chamada “entrada” no mesmo diretório que programa SVT estiver sendo executado. Com um clique, no botão “processar”, serão inseridos os alvos artificiais no centro das imagens selecionadas e salvos de forma automática, na pasta “saída”, também criada no diretório com as respectivas coordenadas. Na próxima versão, serão inseridos outros modelos de sensores embarcados por VANT’S da DJI, tornando possível aplicar a mesma metodologia com outros modelos.

Figura 39 - *Interface* do SVT desenvolvido em linguagem de programação *Python*



Fonte: O autor (2021).

Na Figura 40, é possível visualizar o alvo virtual criado no ponto principal (pp) da imagem, na posição de linha (2736)/coluna (1824) na posição nadir.

Figura 40 - Imagem mostrando o alvo virtual centrado, criado de forma automática



Fonte: O autor (2021).

### 3.8 Processamento fotogramétrico



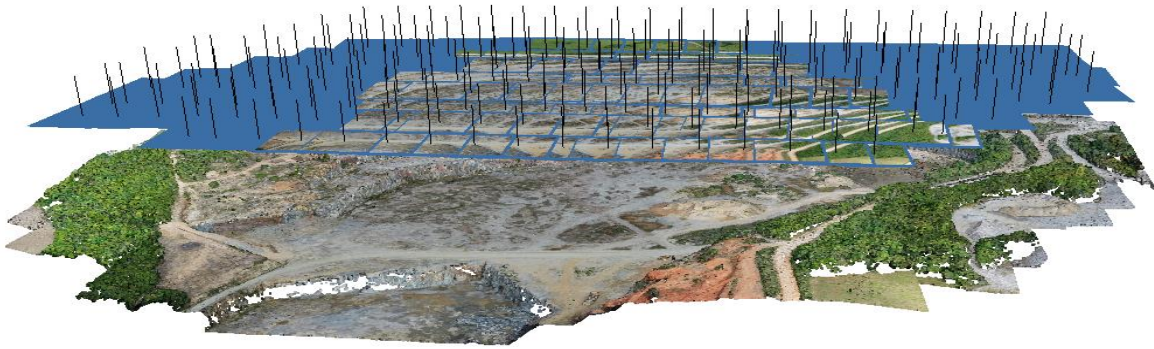
No processamento das imagens aéreas, foi utilizado o programa *MetaShape Professional* desenvolvido pela empresa *Agisoft*. Este *software* apresenta uma rotina automática de reconhecimento de imagens capturadas por diferentes VANT's e câmeras, permitindo a criação de ortomosaicos com alta resolução espacial com base nas semelhanças radiométricas entre as imagens ou coordenadas posicionais (TADDIA; STECCHI; PELLEGRINELLI, 2020; ZHOU et al., 2020).

Inicia-se o processamento com a análise visual da qualidade das imagens e, além disso, verificou-se a compatibilidade entre o número de fotos registradas pela câmera do VANT e o número de posições registradas no arquivo TXT de PCAs. O próximo passo será a importação das imagens, criação de dois blocos de processamento fotogramétrico, onde no primeiro (1) bloco constam as imagens utilizadas como PCAs e no segundo (2) bloco as imagens do plano de voo.

No bloco fotogramétrico (1), primeiramente é gerada a nuvem esperça por semelhança radiométrica entre pixels homólogos em diferentes imagens com sobreposição longitudinal e lateral. Para tanto, o *MetaShape* utiliza a técnica *Structure from Motion* (SfM), onde cria modelos tridimensionais através de fotografias digitais bidimensionais (ZHOU et al., 2020). Sequencialmente, foi realizada a substituição das coordenadas nativas registradas pelo receptor GNSS do VANT, pelas coordenadas armazenadas e pós-processadas. Esse processo é realizado através da importação de um arquivo *American Standard Code Information Interchange* (ASCII), exportado no pós-processamento no RTKPOST, onde constam as coordenadas processadas do Ponto Principal (pp) de cada imagem.

A próxima etapa refere-se ao alinhamento das imagens (Figura 41), em que são definidos os parâmetros da câmera utilizada, o pp e a rotação das fotos. Foi verificado também se toda a área de interesse havia sido imageada durante o levantamento.

Figura 41 - Alinhamento das imagens



Fonte: O autor (2021).

Para a geração de produtos acurados através de levantamentos com VANT, com precisões na escala centimétrica, Bolkas (2019), Tomastik *et al.* (2019), Zhang *et al.* (2019), Zhou *et al.* (2019), Taddia, Stecchi e Pellegrinelli (2020), Yu *et al.* (2019) e Zhou *et al.* (2019), recomendam o uso de pelo menos um ponto de controle em solo, para a calibração da câmera com sensor de varredura do tipo *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS) de forma automática no processamento. Na calibração, são utilizados geralmente oito parâmetros, sendo: a distância focal ( $f$ ), o ponto principal em  $x$  e  $y$  ( $pp_x, pp_y$ ), coeficientes do polinômio de distorção radial ( $r$ ) simétrica de terceira ordem ( $k_1, k_2, k_3$ ) e descritos na Eq. (2) e os coeficientes de distorção tangencial ( $P_1, P_2$ ) expressos na Eq. (3), sendo possível a utilização de dois complementares, os parâmetros de afinidade e não-ortogonalidade ( $b_1, b_2$ ) conforme Eq. (4).

$$\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta x_d &= P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy \\ \Delta y_d &= 2P_1xy + P_2(r^2 + 2y^2) \\ r^2 &= x^2 + y^2 = (x - PP_x)^2 + \\ &\quad (y - PP_y)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Delta x_a = b_1x + b_2y \quad (4)$$

Através da inserção do ponto de controle em solo, que foi adotado como ponto de decolagem ou ponto conhecido, os parâmetros supracitados são estimados e ajustados. A próxima etapa é deslocar o marcador para o pp (ponto principal), que

neste caso está visível em todas imagens de controle que passaram pelo software SVT (Figura 42). A partir deste processo, são novamente estimadas as posições das imagens do bloco (2), tendo como base as imagens do bloco (1), em que o *Metashape* atualiza as posições agora considerando *pixels* homólogos em duas ou mais imagens dependentes da sobreposição entre imagens contíguas estipulada no projeto de aerolevanteamento.

Figura 42 - Ponto de Controle Aéreo



Fonte: O Autor (2021)

As próximas etapas de processamento são sequenciais, seguindo o *workflow* do Metashape, sem interferência ou sem alteração nos parâmetros de configuração de processamento (rotina automática), utilizando-se do máximo de interações na busca de pixels homólogos entre as imagens, ou seja, nível alto de processamento. Geração da nuvem densa de pontos, seguido pela construção do MDS e do ortomosaico, sendo que em ambos foram extraídas as coordenadas (X e Y no ortomosaico e Z no MDS) para a avaliação da acurácia posicional. Na geração destes produtos, o MetaShape utiliza a tecnologia *multiview*, que permite processar imagens

arbitrárias, com variação de sobreposição, desde que existam pontos homólogos em imagens distintas (ZHOU et al., 2020).

### 3.9 Avaliação da acurácia posicional

Para a avaliação da acurácia posicional planialtimétrica, primeiramente, foi verificado o número de pontos necessários para a geração de uma análise estatística confiável. Segundo à norma americana *National Standard for Spatial Data Accuracy* (Padrão Nacional para Acurácia de Dados Espaciais) NSSDA, são necessários no mínimo 20 pontos de checagem para uma análise estatística com alto grau de confiabilidade. Trabalhos como de Bolkas (2019), Tomastik et al. (2019), Zhang et al. (2019), Zhou et al. (2019) e Yu et al. (2020), utilizam 12 ou mais pontos de checagem, sendo que ambos trabalhos concordam com a norma NSSDA e reconhecem a confiabilidade nas análises geradas com 20 pontos de checagem.

Cabe destacar que também é necessária uma boa distribuição espacial entre os pontos de checagem, por essa razão foram distribuídos por todas as bancadas de mineração, nas posições menos e mais elevadas da topografia, além disso, contemplando os pontos extremos da área de estudo, conforme proposta de Santos et al. (2016), Yu et al. (2020). Santos (2016), propõe o uso do método determinístico do vizinho mais próximo, sendo o índice R obtido pela razão da média observada da distância ao vizinho mais próximo, com a média esperada para uma distribuição aleatória de pontos. Essa etapa do processo foi realizada no software SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas) versão 5.5.6.

Consequente, é realizada a comparação das coordenadas assumidas como Referência  $\text{\textcircled{R}}$ , que foram determinados com o GNSS RTK no terreno e as coordenadas identificadas como Teste ( $T$ ) e extraídas no ortomosaico e no MDS, aplicando-se as Eq. (5), para os três eixos de coordenadas R. Nesse processo também é realizado o cálculo da discrepância planimétrica ( $\Delta_{2d}$ ), buscando enquadrar os resultados na PEC-PCD, conforme Eq. (6).

$$\Delta C = (C_T - C_R) \quad (5)$$

Onde:

$C_T$ : Coeficiente de distorção tangencial

$C_R$ : Coeficiente de distorção radial

$$\Delta_{2d} = \sqrt{(X_T - X_R)^2 + (Y_T - Y_R)^2} \quad (6)$$

Onde:

$X_T$ : Coordenada Este Teste

$X_R$ : Coordenada Este Referência

$Y_T$ : Coordenada Norte Teste

$Y_R$ : Coordenada Norte Referência

Com os mesmos dados, gera-se a estatística da média (Eq. 7), e o desvio padrão (Eq. 8), para os eixos X, Y e Z, onde  $n$  é o número total de amostras.

$$\overline{\Delta C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta C \quad (7)$$

$$S_{\Delta C} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta C - \overline{\Delta C})^2} \quad (8)$$

Na sequência, é realizado o teste estatístico amostral do  $t$  de Student, objetivando verificar se o resultado está no intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula (ELIAS et al., 2017). O teste  $t$  é aplicado objetivando-se um nível de confiança  $(1 - \alpha)$  igual a 90% ( $\alpha = 0,10$ ) e calculado conforme Eq. 9 para os três eixos de coordenadas.

$$T_C = \frac{\Delta C}{S_{\Delta C}} \sqrt{n} \quad (9)$$

Sendo assim, a partir no número de pontos de checagem coletados em campo, encontra-se um valor limite  $t(n - 1, \alpha/2)$ , que pode ser obtido através dos valores tabelados, de acordo com a Eq. 10. Se o valor do teste  $t$  de Student inferior ao valor limite tabelado para as variáveis X, Y e Z analisadas. A partir desse teste estatístico, pode-se afirmar que o produto em avaliação apresenta o valor da média das discrepâncias posicionais igual a zero, ou seja, assumindo-se que o produto não apresenta viés em suas coordenadas ou erros sistemáticos (MENEZES et al., 2019).

$$|t_{\text{calc}}| < t_{n-1;\alpha/2} \quad (10)$$

Para análise da precisão, Silva (2015), Silva et al. (2016) e Elias et al. (2017), recomendam o uso do teste Qui-quadrado e o enquadramento conforme estabelecido na Especificação Técnica da ET-CQDG e o Erro Padrão Esperado ( $\sigma_C$ ), para determinado eixo das coordenadas. Com o  $\sigma_C$  conhecido, aplica-se um teste de hipótese, comparando o desvio padrão das discrepâncias das alturas com o EP esperado para a classe PEC-PCD a qual deseja testar,  $H_0: S_{\Delta C}^2 = \sigma_C^2$ , contra  $H_1: S_{\Delta C}^2 > \sigma_C^2$  (SILVA et al., 2016; BRUCH et al., 2019). O valor do teste Qui-quadrado calculado  $x_C^2$  conforme Eq. 11 deve apresentar valor inferiores ao teste Qui-quadrado tabelado  $x_{n-1,\alpha}^2$  demonstrado na Eq. 12, possibilitando determinar a escala de representação a qual o ortomosaico e o MDS se enquadra dentro das classes (A,B,C,D). O tamanho da amostra é representado pelo  $n$ , o  $s$  é o desvio padrão das discrepâncias e  $\sigma$  é o EP esperado para uma determinada classe PEC-PCD.

$$X_C^2 = (n-1) \frac{s_{\Delta C}^2}{\sigma_C^2} \quad (11)$$

$$x_C^2 \leq X_{(n-1,\alpha)}^2 \quad (12)$$

Por fim, utilizando-se a classificação de acordo com o padrão do Decreto nº 89.817 (BRASIL, 1984) e da ET-CQDG (DSG, 2016), com a geração de produtos digitais acurados na escala de 1:1.000, salienta-se que 90% dos pontos coletados no ortomosaico e MDS, em relação aos seus pontos homólogos de maior precisão, não deverão apresentar discrepâncias superiores ou iguais aos limites definidos para o produto desejado, conforme determina o PEC. Além disso, o resultado do Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square* – RMS) das amostras deverá ser igual ou inferior ao valor do EP, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores de tolerância para avaliação da acurácia posicional planialtimétrica segundo o Decreto-lei nº 89.817

Classe (PEC)	Classe (PEC-PCD)	Planimetria		Altimetria	
		PEC	EP	PEC	EP
-	A	0,28 mm	0,17 mm	0,27 eq.	1/6 eq.
A	B	0,50 mm	0,30 mm	½ eq.	1/3 eq.
B	C	0,80 mm	0,50 mm	3/5 eq.	2/5 eq.

C	D	1,00 mm	0,60 mm	$\frac{3}{4}$ eq.	$\frac{1}{2}$ eq.
---	---	---------	---------	-------------------	-------------------

\*EP – tolerância denominada de Erro Padrão, de acordo com o Decreto-lei nº. 89.817

Fonte: O autor (2021)

## **CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E ANÁLISES**

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos na aplicação da metodologia descrita no trabalho, onde são expostos os resultados provenientes do processamento dos dados GNSS e imagens capturadas pelo VANT.

Para o desenvolvimento desta pesquisa, primeiramente, se faz necessário a determinação das coordenadas dos pontos de checagem, assim como a avaliação da distribuição dos mesmos, verificando se estes apresentam boa distribuição espacial, conforme proposta de Santos et al. (2016) e disponível no aplicativo GeoPEC. Este método compara a distância média entre os vizinhos mais próximos com um conjunto de pontos que têm um padrão definido teoricamente.

Para isso, foram utilizados os 20 pontos de checagem conforme Tabela 13 distribuídos na área de estudo de acordo com a localização dos triângulos em vermelho mostrados na Figura 43. O resultado demonstra que existe um padrão disperso nas três ordens analisadas, com índice R na primeira ordem igual a 1,5508, na segunda ordem um R de 1,2486 e na terceira ordem com índice R igual a 1,1748. Segundo Merchant (1982), Montgomery e Runger (2010) e Santos et al. (2016), padrões dispersos ou aleatórios presentes em no mínimo três ordens, validam os pontos de checagem como dados espaciais de referência estatística (Figura 44). A dispersão em função da área variou de 0,000157 a 0,000215 pontos por m<sup>2</sup>.

Tabela 13 - Coordenadas dos pontos de checagem (R)

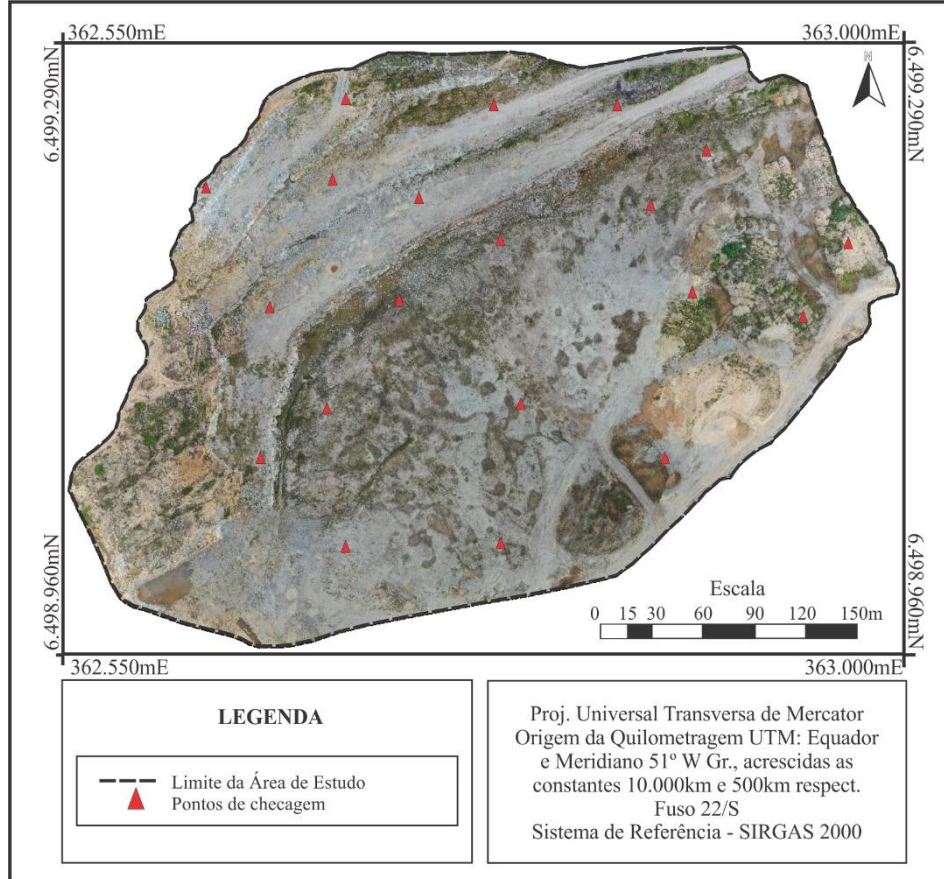
<b>Nome</b>	<b>Coordenadas de Referência (R)</b>		
	<b>E (m)</b>	<b>N (m)</b>	<b>Z (m)</b>
<b>Ponto 01</b>	362.698,450	6.499.212,044	138,809
<b>Ponto 02</b>	362.777,492	6.499.247,318	140,537
<b>Ponto 03</b>	362.849,454	6.499.251,699	130,566
<b>Ponto 04</b>	362.742,960	6.499.205,933	127,775
<b>Ponto 05</b>	362.665,358	6.499.151,796	127,221
<b>Ponto 06</b>	362.703,308	6.499.017,847	115,729
<b>Ponto 07</b>	362.669,806	6.499.073,578	115,384
<b>Ponto 08</b>	362.691,622	6.499.097,156	115,165
<b>Ponto 09</b>	362.784,301	6.499.023,026	115,927
<b>Ponto 10</b>	362.871,288	6.499.064,609	116,273
<b>Ponto 11</b>	362.792,618	6.499.093,773	115,795
<b>Ponto 12</b>	362.769,171	6.499.145,130	115,384
<b>Ponto 13</b>	362.787,012	6.499.185,754	115,293
<b>Ponto 14</b>	362.863,508	6.499.200,905	115,718
<b>Ponto 15</b>	362.891,049	6.499.228,076	115,576
<b>Ponto 16</b>	362.967,278	6.499.180,976	116,159
<b>Ponto 17</b>	362.952,581	6.499.149,175	115,56
<b>Ponto 18</b>	362.660,484	6.499.228,160	151,537



<b>Ponto 19</b>	362.696,201	6.499.257,026	154,017
<b>Ponto 20</b>	362.633,816	6.499.221,971	160,127

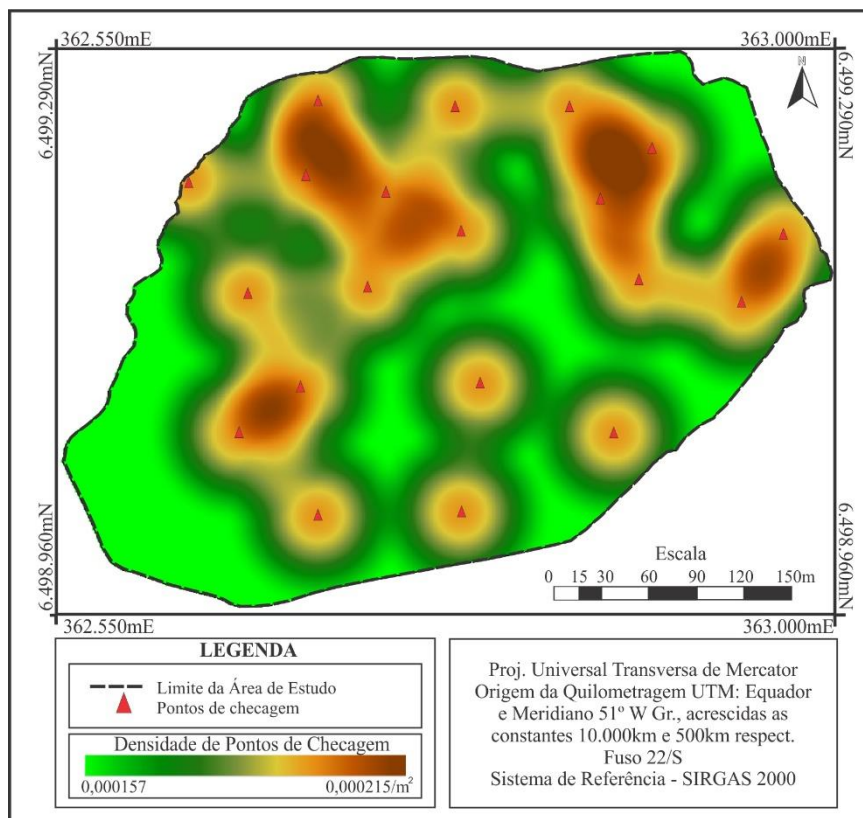
Fonte: O autor (2021)

Figura 43 - Distribuição dos pontos de checagem na área de estudo



Fonte: O autor (2021)

Figura 44 - Distribuição da densidade espacial dos pontos de checagem



Fonte: O autor (2021)

Como este trabalho busca a criação de uma metodologia de aerolevanteamento com VANT apoiado na técnica PPK, as posições das 60 imagens processadas no RTKPOST e os registros posicionais são importados posteriormente no *MetaShape*. No processamento fotogramétrico, primeiramente foi realizado o alinhamento das imagens e gerada a nuvem esparsa de pontos e seguida iniciou a rotina de processamento.

Na avaliação da acurácia planimétrica e altimétrica, é necessário definir a classe e escala de mapeamento, sendo importante citar os trabalhos de Alves Júnior et al. (2015), Neto et al. (2017) e Oliveira e Brito (2019), os quais discorrem sobre a viabilidade do uso de aerolevanteamentos realizados com VANT's e apoiados com pontos de controle, para a geração de documentos cartográficos planimétricos acurados, na classe A PEC-PCD com escala 1:1.000, assim como os trabalhos de Santos et al. (2016), para a elaboração de produtos cartográficos altimétricos na mesma classe e escala.

Para avaliação da eficácia do método abordado neste trabalho, foram realizadas 3 alturas de voo distintas para coleta dos PCAs, sendo elas de 40m, 60m e 80m.

No voo de 40 m dos PCAs se faz a análise das coordenadas tridimensionais lidas no ortomosaico e no MDS, definidas aqui como teste ( $T$ ), e as coordenadas entendidas como referência ( $R$ ), obtidas com o GNSS em campo sobre os alvos pré-sinalizados, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 - Coordenadas dos pontos (T) do MDS utilizando PCAs com altura de 40 metros

<b>Nome</b>	<b>Este T (m)</b>	<b>Norte T (m)</b>	<b>Altitude T (m)</b>
<b>Ponto 01</b>	362.698,351	6.499.211,902	138,792
<b>Ponto 02</b>	362.777,549	6.499.247,322	140,494
<b>Ponto 03</b>	362.849,586	6.499.251,827	130,466
<b>Ponto 04</b>	362.742,914	6.499.205,814	127,624
<b>Ponto 05</b>	362.665,302	6.499.151,673	127,077
<b>Ponto 06</b>	362.703,408	6.499.017,755	115,732
<b>Ponto 07</b>	362.669,694	6.499.073,477	115,374
<b>Ponto 08</b>	362.691,709	6.499.097,034	115,188
<b>Ponto 09</b>	362.784,460	6.499.022,940	116,055
<b>Ponto 10</b>	362.871,264	6.499.064,618	116,309
<b>Ponto 11</b>	362.792,713	6.499.093,700	115,820
<b>Ponto 12</b>	362.769,225	6.499.144,983	115,219
<b>Ponto 13</b>	362.787,017	6.499.185,705	115,120
<b>Ponto 14</b>	362.863,600	6.499.200,934	115,689
<b>Ponto 15</b>	362.891,215	6.499.228,180	115,284
<b>Ponto 16</b>	362.967,446	6.499.181,042	116,161
<b>Ponto 17</b>	362.952,671	6.499.149,082	115,733
<b>Ponto 18</b>	362.660,429	6.499.228,049	151,553
<b>Ponto 19</b>	362.696,122	6.499.256,922	154,012
<b>Ponto 20</b>	362.633,688	6.499.221,885	160,098

Fonte: O autor (2021)

Tabela 15 - Discrepâncias dos pontos do MDS utilizando PCAs com altura de 40 metros

<b>Nome</b>	<b>Dif. Este (m)</b>	<b>Dif. Norte (m)</b>	<b>Dif. Altitude (m)</b>	<b>Discrepância Planimétrica (m)</b>	<b>Discrepância Altimétrica (m)</b>
<b>Ponto 01</b>	-0,099	-0,142	-0,017	0,173	0,017
<b>Ponto 02</b>	0,057	0,004	-0,043	0,057	0,043
<b>Ponto 03</b>	0,132	0,128	-0,100	0,184	0,100
<b>Ponto 04</b>	-0,046	-0,119	-0,151	0,128	0,151
<b>Ponto 05</b>	-0,056	-0,123	-0,144	0,135	0,144
<b>Ponto 06</b>	0,100	-0,092	0,003	0,136	0,003
<b>Ponto 07</b>	-0,112	-0,101	-0,010	0,150	0,010
<b>Ponto 08</b>	0,087	-0,122	0,023	0,150	0,023
<b>Ponto 09</b>	0,159	-0,086	0,128	0,180	0,128
<b>Ponto 10</b>	-0,024	0,009	0,036	0,025	0,036
<b>Ponto 11</b>	0,095	-0,073	0,025	0,119	0,025

<b>Ponto 12</b>	0,054	-0,147	-0,165	0,157	0,165
<b>Ponto 13</b>	0,005	-0,049	-0,173	0,049	0,173
<b>Ponto 14</b>	0,092	0,029	-0,029	0,097	0,029
<b>Ponto 15</b>	0,166	0,104	-0,292	0,196	0,292
<b>Ponto 16</b>	0,168	0,066	0,002	0,181	0,002
<b>Ponto 17</b>	0,090	-0,093	0,173	0,129	0,173
<b>Ponto 18</b>	-0,055	-0,111	0,016	0,124	0,016
<b>Ponto 19</b>	-0,079	-0,104	-0,005	0,131	0,005
<b>Ponto 20</b>	-0,128	-0,086	-0,029	0,154	0,029

Fonte: O autor (2021)

A média das discrepâncias foi de 0,030, -0,055 e -0,038 (m) nos eixos E, N e Z, respectivamente, com uma discrepância posicional planimétrica ( $\Delta P$ ) média de 0,133m (Tabela 15). Cabe destacar que para um produto acurado, 90% dos pontos devem apresentar discrepâncias inferiores a PEC-PCD, 0,28cm na planimetria e 0,27 na altimetria, sendo que nesta pesquisa, todos os pontos de checagem apresentaram discrepâncias menores que os limites do PEC-PCD (Tabela 16). O desvio padrão acompanhou os resultados da média, com resultados de 0,098, 0,083 e 0,108 (m) nos eixos E, N e Z, com um desvio padrão planimétrico médio de 0,046m.

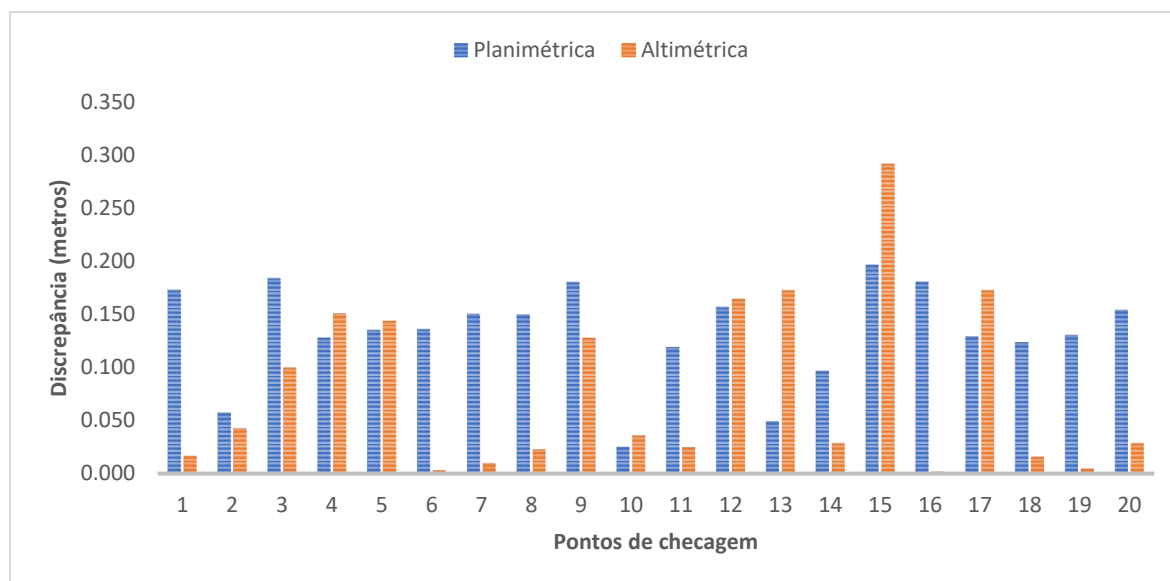
Tabela 16 - PEC-PCD para produtos cartográficos classe A

Planimetria	Escala	Classe	PEC (m)	Discrepância Média			Condição $\Delta P +90\% \leq$ PEC	Classificação
	1:1.000			A	0,28	E		
				0,030	-0,055	0,133	100%	Aprovado
Altimetria	Escala	Classe	PEC (m)	Discrepância Média			Condição $\Delta Z +90\% \leq$ PEC	Classificação
	1:1.000			A	0,27	Z		
				0,078			100%	Aprovado

Fonte: O autor (2021).

Resultados semelhantes foram encontrados por Alves Júnior et al. (2015), Silva et al. (2016), Neto et al. (2017), Neto (2018), Bruch et al. (2019), no entanto, ambos trabalhos utilizaram pontos de controle materializados em solo. Podemos observar no gráfico da Figura 45 que as discrepâncias posicionais variaram na planimetria na faixa de 0,025 m de mínima e máxima de 0,196m, já na altimetria 0,005m de mínima e máxima de 0,292 m, observando que esta discrepância elevada está diretamente relacionada a falta de PC nas proximidades.

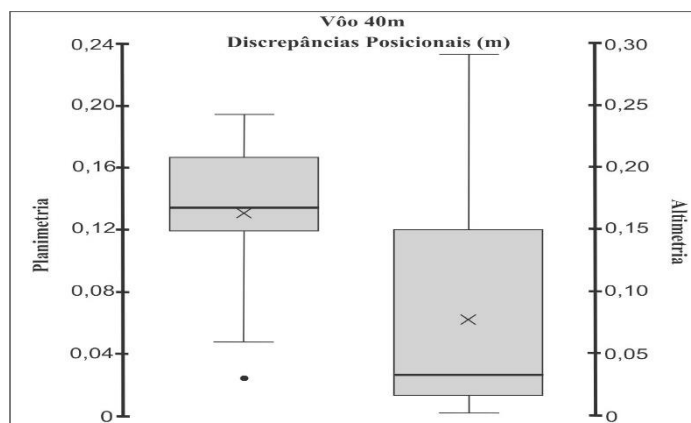
Figura 45 - Discrepâncias posicionais obtidas do ortomosaico e MDS na planimetria e altimetria dos pontos do MDS utilizando PCAs com altura de 40 metros



Fonte: O autor (2021)

Segundo DAWSON (2011) é chamado de valor extremo (outlier) quando uma determinada medida ou valor apresenta um grande afastamento em relação aos outros valores presentes na amostra de checagem. Para SCHWERTMAN; OWEBS e ADMAN (2004) o boxplot é uma técnica gráfica para detecção de outliers, sendo muito utilizado devido à simplicidade em sua análise. Para a detecção de valores extremos foram elaborados os *boxplots* para avaliar eventuais discrepâncias planimétricas e altimétricas, representadas na Figura 46, em que se verifica a inexistência de *outliers*, conferindo confiabilidade às amostras. Consequente, aplicou-se o teste estatístico de normalidade de Shapiro-Wilk ao nível de confiança de 95%, cujos resultados demonstram que a amostra é Normal ou Gaussiana.

Figura 46 - Boxplot com as discrepâncias posicionais planimétricas e altimétricas.



Fonte: O autor (2021).

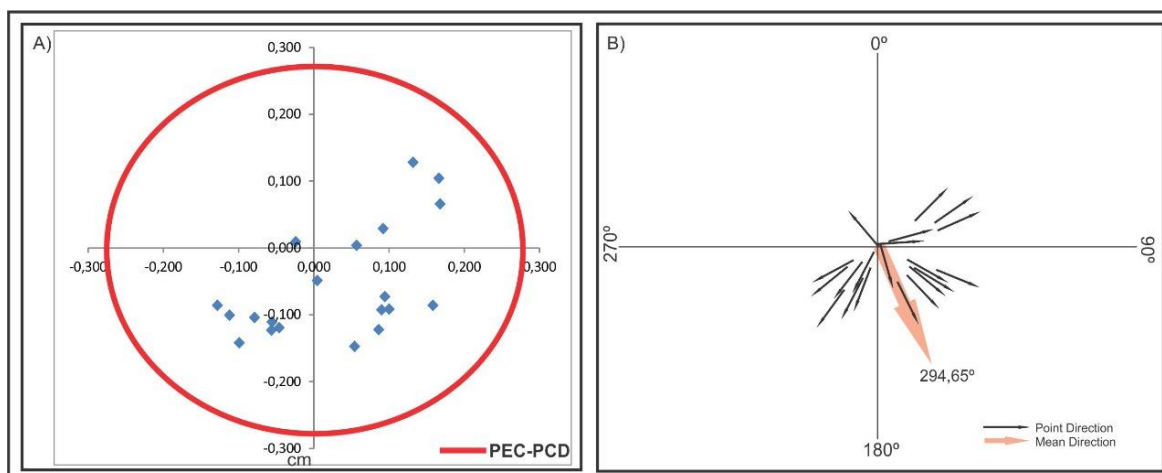
Verificada a ausência de *outliers*, a próxima etapa foi a aplicação do teste *t* de Student, para avaliar as tendências de distribuição, ou seja, determinar se os resultados amostrais estão dentro do intervalo de aceitação ou rejeição. O limiar aceitável, para um nível de confiança igual a 90% ( $\alpha = 0,10$ ), ou seja,  $1 - \alpha$ , tendo como referência os 20 pontos de checagem obtidos em campo e 19 graus de liberdade, obtém-se o valor limite de  $t_{90}(19)$  tabelado igual a 1,729. Verificou-se que o  $t_{cal}$  para todos os eixos era tendencioso, sendo o  $t_{cal}$  resultante 1,376, -1,995 e -1,533, para os eixos E, N e Z, respectivamente (Tabela 17). Esses resultados demonstram uma tendenciosidade direcional em ambos os produtos, ortomosaico e MDS, ou seja, um efeito sistemático nas posições dos produtos resultantes e avaliados nos pontos testados (Figura 44A), sendo que a direção de deslocamento planimétrico médio é de  $294,65^\circ$  (Figura 47). Resultados semelhantes foram encontrados por Zhou et al. (2019), ao utilizar diversas câmeras de varredura e Zhou et al. (2020), ao utilizar a mesma câmera desta pesquisa, atribuindo a tendenciosidade dos dados ao atraso de registro da linha/coluna causada pela câmera do tipo Rolling Shutter.

Tabela 17 - Resultado do teste *t* de Student e enquadramento

Planimetria e Altimetria	Amostras	$t_{90\%}$ tabelado ( $t_{tab}$ )	$t$ Calculado ( $t_{cal}$ )			Condição $t_{cal} \leq t_{tab}$	Classificação
			E	N	Z		
	20	1,789	1,376	-1,995	-1,553		Tendencioso

Fonte: O autor (2021).

Figura 47 - (A) Distribuição planimétrica tendenciosa dos pontos testados. (B) Vetor de direção entre a posição de referência a testada.



Fonte: O autor (2021).

Visando a análise da precisão dos resultados, foi aplicado o teste Qui-Quadrado, conforme a proposta de Merchant (1982), Galo e Camargo (1994), Leal (1998), Silva e Nazareno (2009), Nazareno et al. (2009) e Côrtes (2010). Em todos os eixos, os resultados foram inferiores ao limite tabelado, sendo  $\chi^2$  12,655, 8,994 e 7,930, em E, N e Z respectivamente (Tabela 18).

Tabela 18 - Resultado do teste Qui-quadrado e enquadramento

Planimetria e Altimetria	Amostras	$\chi^2$ Tabelado	$\chi^2$ Calculado			Condição $\chi^2 \leq \chi^2$ Tabelado	Classificação
			E	N	Z		
	20	27,204	12,655	8,994	7,930		Preciso

Fonte: O autor (2021).

Por fim, calcula-se o EQM e compara-se com o EP esperado para uma determinada escala e classe PEC-PCD, no caso da planimetria e Escala (equidistância das curvas de nível) e classe PEC-PCD, no caso da altimetria. Os valores de EQM foram de 0,098m, 0,082m e 0,107m, em E, N e Z respectivamente (Tabela 19). O EP planimétrica e altimétrico esperado é de 0,17m para documentos cartográficos digitais na escala 1:1.000 na classe A da PEC-PCD. Sendo assim, tanto o ortomosaico, quanto o MDS foram enquadrados como PEC-PCD Classe A.

Tabela 19 - Enquadramento dos resultados do EQM

Planimetria	Escala	Classe	EP (m)	EQM Calculado		Condição	Classificação
				E	N		
	1:1.000	A	0,17	0,098	0,082	$EQM \leq EP$	Aprovado
Altimetria	Escala	Classe	EP (m)	EQM Calculado		Condição	Classificação
				Z			
	1:1.000	A	0,17	0,107		$EQM \leq EP$	Aprovado

Fonte: O autor (2021).

No voo de 60 m dos PCAs se faz a análise das coordenadas tridimensionais lidas no ortomosaico e no MDS, definidas aqui como teste ( $T$ ), e as coordenadas entendidas como referência ( $R$ ), obtidas com o GNSS em campo sobre os alvos pré-sinalizados, conforme apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 - Coordenadas dos pontos (T) do MDS utilizando PCAs com altura de 60 metros

Nome	Este T (m)	Norte T (m)	Altitude T (m)
Ponto 01	362.698,479	6.499.211,834	138,608
Ponto 02	362.777,540	6.499.247,315	140,587
Ponto 03	362.849,396	6.499.251,899	130,788
Ponto 04	362.743,001	6.499.205,740	127,683
Ponto 05	362.665,471	6.499.151,541	126,917
Ponto 06	362.703,472	6.499.017,305	115,934
Ponto 07	362.669,779	6.499.073,156	115,593
Ponto 08	362.691,845	6.499.096,754	115,281
Ponto 09	362.784,563	6.499.022,606	116,477
Ponto 10	362.871,289	6.499.064,595	116,304
Ponto 11	362.792,785	6.499.093,530	115,863
Ponto 12	362.769,301	6.499.144,857	115,366
Ponto 13	362.787,057	6.499.185,630	115,197
Ponto 14	362.863,469	6.499.201,039	115,604
Ponto 15	362.890,961	6.499.228,362	115,412
Ponto 16	362.967,055	6.499.181,438	116,628
Ponto 17	362.952,413	6.499.149,414	115,127
Ponto 18	362.660,618	6.499.228,125	151,242
Ponto 19	362.696,272	6.499.256,995	153,702
Ponto 20	362.633,903	6.499.222,061	159,322

Fonte: O autor (2021)

Tabela 21 - Discrepâncias dos pontos do MDS utilizando PCAs com altura de 60 metros



Nome	Dif. Este(m)	Dif. Norte (m)	Dif. Altitude (m)	Discr Planimétrica (m)	Discr Altimétrica (m)
Ponto 01	0,007	-0,139	0,098	0,140	0,098
Ponto 02	0,048	-0,003	0,050	0,048	0,050
Ponto 03	-0,035	0,102	0,089	0,108	0,089
Ponto 04	0,042	-0,126	0,077	0,133	0,077
Ponto 05	0,025	-0,157	0,001	0,159	0,001
Ponto 06	0,145	-0,109	-0,060	0,181	0,060
Ponto 07	-0,115	-0,160	0,075	0,197	0,075
Ponto 08	0,039	-0,154	0,013	0,159	0,013
Ponto 09	0,073	-0,156	0,069	0,172	0,069
Ponto 10	0,001	-0,014	0,031	0,014	0,031
Ponto 11	0,088	-0,095	-0,080	0,130	0,080
Ponto 12	0,052	-0,082	0,061	0,097	0,061
Ponto 13	0,046	-0,124	-0,096	0,132	0,096
Ponto 14	-0,038	0,135	-0,115	0,140	0,115
Ponto 15	-0,022	0,087	-0,065	0,090	0,065
Ponto 16	-0,007	0,121	-0,085	0,122	0,085
Ponto 17	-0,070	0,121	0,005	0,140	0,005
Ponto 18	-0,066	-0,202	-0,164	0,213	0,164
Ponto 19	-0,054	-0,109	-0,090	0,122	0,090
Ponto 20	-0,077	-0,114	-0,009	0,138	0,009

Fonte: O autor (2021)

A média das discrepâncias foi de 0,004, -0,059 e -0,010 (m) nos eixos E, N e Z, respectivamente, com uma discrepância posicional planimétrica ( $\Delta P$ ) média de 0,132m (Tabela 21). Cabe destacar que para um produto acurado, 90% dos pontos devem apresentar discrepâncias inferiores a PEC-PCD, 0,28cm na planimetria e 0,27 na altimetria, sendo que nesta pesquisa, todos os pontos de checagem apresentaram discrepâncias menores que os limites do PEC-PCD (Tabela 22). O desvio padrão acompanhou os resultados da média, com resultados de 0,065, 0,112 e 0,079 (m) nos eixos E, N e Z, com um desvio padrão planimétrico de 0,047m.

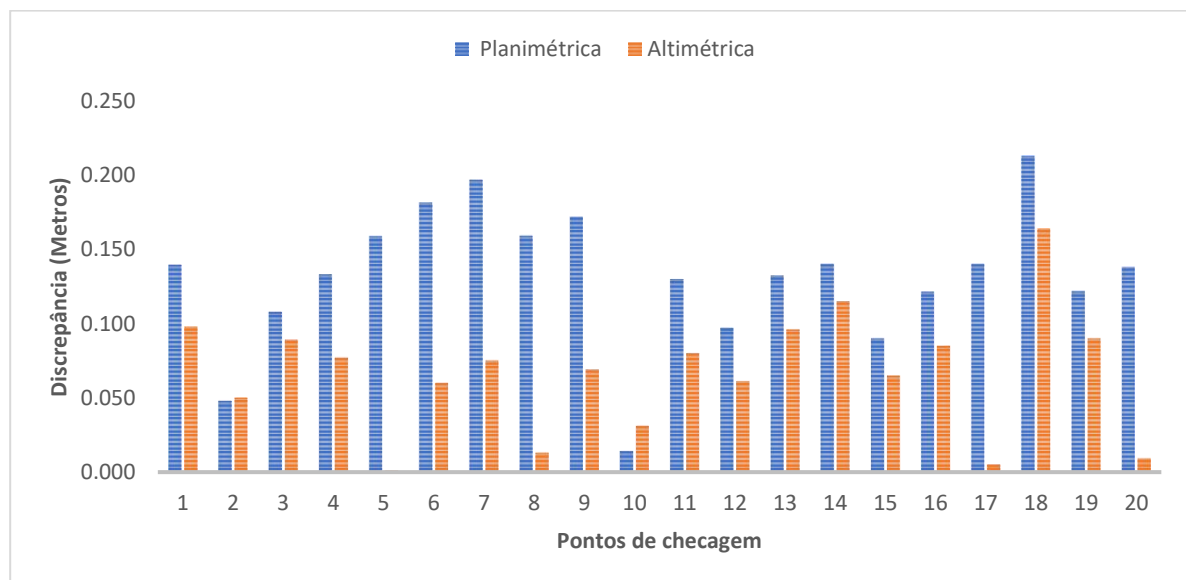
Tabela 22 - PEC-PCD para produto cartográficos classe A

Planimetria	Escala	Classe	PEC (m)	Discrepância Média			Condição $\Delta P +90\% \leq$ PEC	Classificação
				E	N	$\Delta P$		
				0,004	-0,059	0,132		
Altimetria	Escala	Classe	PEC (m)	Discrepância Média			Condição $\Delta Z +90\% \leq$ PEC	Classificação
				Z				
				0,067				

Fonte: O autor (2021)

Resultados semelhantes foram encontrados por Alves Júnior et al. (2015), Silva et al. (2016), Neto et al. (2017), Neto (2018), Bruch et al. (2019), ambos trabalhos utilizaram pontos de controle. Observa-se, no gráfico da Figura 48, que as discrepâncias posicionais variaram na planimetria na faixa de 0,014 m de mínima e máxima de 0,213m, já na altimetria 0,001m de mínima e máxima de 0,164 m.

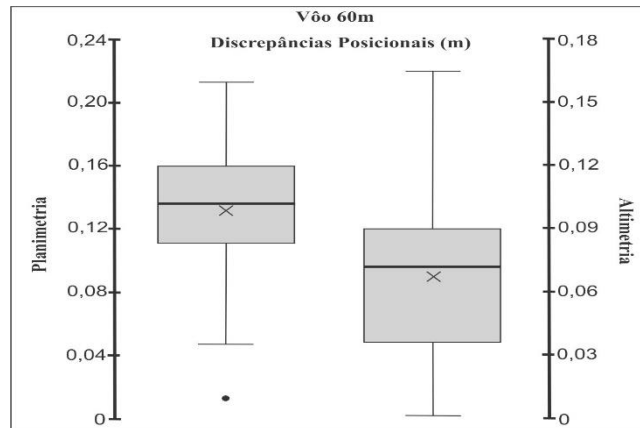
Figura 48 - Discrepâncias posicionais obtidas do ortomosaico e MDS na planimetria e altimetria dos pontos do MDS utilizando PCAs com altura de 40 metros



Fonte: O autor (2021)

Para a detecção de *outliers*, foram elaborados os *boxplots* para as discrepâncias planimétricas e altimétricas, representadas na Figura 49, onde verifica-se a inexistência de *outliers*, conferindo confiabilidade às amostras. Consequente, aplicou-se o teste estatístico de normalidade de Shapiro-Wilk ao nível de confiança de 95%, onde os resultados demonstram que a amostra é segue uma distribuição Normal ou Gaussiana.

Figura 49 - Boxplot com as discrepâncias posicionais planimétricas e altimétricas



Fonte: O autor (2021).

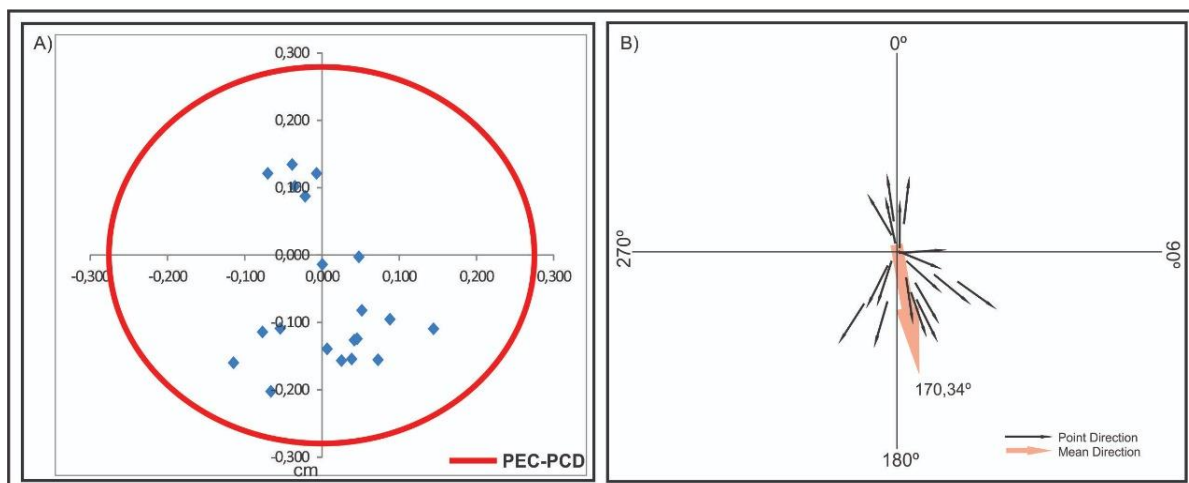
Vista a ausência de *outliers*, a próxima etapa foi a aplicação do teste *t* de Student, a qual avalia as tendências de distribuição, ou seja, estima se os resultados amostrais estão dentro do intervalo de aceitação ou rejeição. O limiar aceitável, para um nível de confiança igual a 90% ( $\alpha = 0,10$ ), ou seja,  $1 - \alpha$ , tendo como referência os 20 pontos de checagem obtidos em campo e 19 graus de liberdade, obtém-se o valor limite de  $t_{90}(19)$  tabelado igual a 1,729. Verificou-se que o  $t_{cal}$  para todos os eixos era tendencioso, sendo o  $t_{cal}$  resultante 0,278, -1,354 e -0,551, para os eixos E, N e Z, respectivamente (Tabela 23). Esses resultados demonstram sem tendência direcional em ambos produtos, ortomosaico e MDS, ou seja, sem efeito sistemático nas posições dos produtos resultantes e avaliados nos pontos testados (Figura 50), sendo que o a direção de deslocamento planimétrico médio é de  $170,34^\circ$ .

Tabela 23 - Resultado do teste t de Student e enquadramento

Planimetria e Altimetria	Amostras	$t_{90\%}$ tabelado ( $t_{tab}$ )	$t$ Calculado ( $t_{cal}$ )			Condição $t_{cal} \leq t_{tab}$	Classificação
			E	N	Z		
	20	1,789	0,278	-1,354	-0,551		Sem tendência

Fonte: O autor (2021).

Figura 50 - (A) Distribuição planimétrica tendenciosa dos pontos testados. (B) Vetor de direção entre a posição de referência a testada.



Fonte: O autor (2021).

Visando a análise da precisão dos resultados, foi aplicado o teste Qui-Quadrado, conforme a proposta de Merchant (1982), Galo e Camargo (1994), Leal (1998), Silva e Nazareno (2009), Nazareno et al. (2009) e Côrtes (2010). Em todos os eixos, os resultados foram inferiores ao limite tabelado, sendo  $x^2$  5,437, 16,466 e 4,234, em E, N e Z respectivamente (Tabela 24).

Tabela 24 - Resultado do teste Qui-quadrado e enquadramento

Planimetria e Altimetria	Amostras	X <sup>2</sup> Tabelado	X <sup>2</sup> Calculado			Condição X <sup>2</sup> ≤ X <sup>2</sup> Tabelado	Classificação Preciso
			E	N	Z		
	20	27,204	5,437	16,466	4,234		

Fonte: O autor (2021).

Por fim, calcula-se o EQM e compara-se com o EP esperado para uma determinada escala e classe PEC-PCD, no caso da planimetria e Escala (equidistância das curvas de nível) e classe PEC-PCD, no caso da altimetria. Os valores de EQM foram de 0,064m, 0,111m e 0,078m, em E, N e Z respectivamente (tabela 24). O EP planimétrica e altimétrico esperado é de 0,17m para documentos cartográficos digitais na escala 1:1.000 na classe A do PEC-PCD. Sendo assim, tanto o ortomosaico, quanto o MDS foram enquadrados como PEC-PCD Classe A (Tabela 25).

Tabela 25 - Enquadramento dos resultados do EQM

Planimetria	Escala	Classe	EP (m)	EQM Calculado		Condição	Classificação
				E	N		
	1:1.000	A	0,17	0,064	0,111	$EQM \leq EP$	Aprovado
Altimetria	Escala	Classe	EP (m)	EQM Calculado		Condição	Classificação
				Z			
	1:1.000	A	0,17	0,078		$EQM \leq EP$	Aprovado

Fonte: O autor (2021).

Por fim, da mesma forma que os anteriores, foi realizado o voo de 80 m para coleta dos PCAs e seguiram-se as mesmas etapas de análise e validação estatística. Com a análise das coordenadas tridimensionais lidas no ortomosaico e no MDS, definidas aqui como teste ( $T$ ), e as coordenadas entendidas como referência ( $R$ ), obtidas com o GNSS em campo sobre os alvos pré-sinalizados, conforme apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 - Coordenadas dos pontos (T) do MDS utilizando PCAs com altura de 60 metros

Nome	Este T (m)	Norte T (m)	Altitude T (m)
Ponto 01	362.698,450	6.499.212,044	138,608
Ponto 02	362.777,492	6.499.247,318	140,537
Ponto 03	362.849,454	6.499.251,699	130,566
Ponto 04	362.742,960	6.499.205,934	127,674
Ponto 05	362.665,443	6.499.151,855	126,795
Ponto 06	362.703,197	6.499.017,696	115,657
Ponto 07	362.669,585	6.499.073,551	115,254
Ponto 08	362.691,683	6.499.097,096	115,116
Ponto 09	362.784,335	6.499.022,824	116,225
Ponto 10	362.871,288	6.499.064,609	116,273
Ponto 11	362.792,619	6.499.093,773	115,795
Ponto 12	362.769,143	6.499.144,957	115,335
Ponto 13	362.787,012	6.499.185,754	115,293
Ponto 14	362.863,508	6.499.200,905	115,718
Ponto 15	362.891,017	6.499.228,124	115,473
Ponto 16	362.967,068	6.499.181,152	116,708
Ponto 17	362.952,581	6.499.149,175	115,260
Ponto 18	362.660,684	6.499.228,327	151,057
Ponto 19	362.696,326	6.499.257,104	153,612
Ponto 20	362.633,881	6.499.222,292	159,242

Fonte: O autor (2021)

Tabela 27 - Discrepâncias dos pontos do MDS utilizando PCAs com altura de 40 metros

Nome	Dif. Este (m)	Dif. Norte (m)	Dif. Altitude (m)	Discr Planimétrica (m)	Discr Altimétrica (m)
Ponto 01	0,017	0,055	0,121	0,058	0,121
Ponto 02	-0,039	0,016	-0,017	0,043	0,017
Ponto 03	0,048	-0,093	-0,116	0,105	0,116
Ponto 04	-0,001	0,109	0,070	0,109	0,070
Ponto 05	0,112	0,112	-0,002	0,158	0,002
Ponto 06	-0,075	0,112	-0,001	0,134	0,001
Ponto 07	-0,023	0,097	0,008	0,099	0,008
Ponto 08	0,002	0,104	-0,002	0,104	0,002
Ponto 09	-0,146	0,069	-0,010	0,161	0,010
Ponto 10	0,025	-0,012	-0,005	0,027	0,005
Ponto 11	-0,066	0,116	-0,096	0,133	0,096
Ponto 12	-0,091	0,044	0,006	0,102	0,006
Ponto 13	-0,008	0,108	0,091	0,108	0,091
Ponto 14	0,047	-0,024	0,085	0,052	0,085
Ponto 15	0,047	-0,072	-0,011	0,086	0,011
Ponto 16	-0,005	-0,087	-0,008	0,087	0,008
Ponto 17	0,130	-0,095	0,116	0,161	0,116
Ponto 18	0,160	0,042	0,164	0,166	0,164
Ponto 19	0,080	0,021	0,128	0,083	0,128
Ponto 20	0,087	0,026	0,012	0,091	0,012

Fonte: O autor (2021)

A média das discrepâncias foi de 0,015, 0,032 e 0,027 (m) nos eixos E, N e Z, respectivamente, com uma discrepância posicional planimétrica ( $\Delta P$ ) média de 0,103m (Tabela 27). Cabe destacar que para um produto acurado, 90% dos pontos devem apresentar discrepâncias inferiores a PEC-PCD, 0,28 m na planimetria e 0,27 m na altimetria, sendo que nesta pesquisa, todos os pontos de checagem apresentaram discrepâncias menores que os limites do PEC-PCD (Tabela 27). O desvio padrão acompanhou os resultados da média, com resultados de 0,077, 0,074 e 0,073 (m) nos eixos E, N e Z, com um desvio padrão planimétrico de 0,040m (Tabela 28).

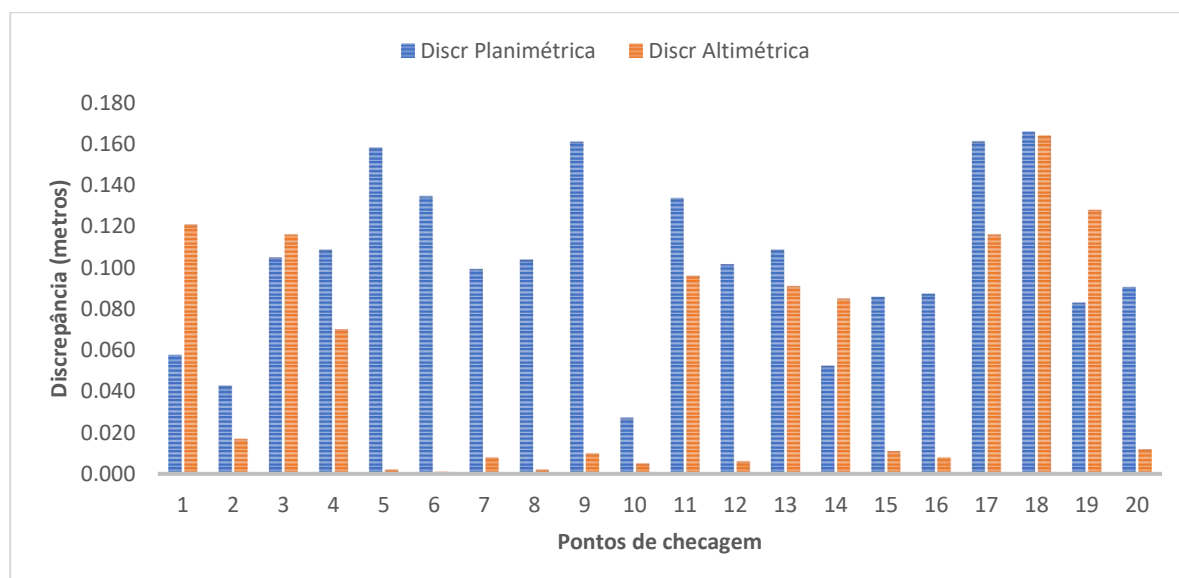
Tabela 28 - PEC-PCD para produtos cartográficos classe A

Planimetria	Escala	Classe	PEC (m)	Discrepância Média			Condição $\Delta P +90\% \leq$ PEC	Classificação
				E	N	$\Delta P$		
	1:1.000	A	0,28	0,015	0,032	0,103	100%	Aprovado
Altimetria	Escala	Classe	PEC (m)	Discrepância Média			Condição $\Delta Z +90\% \leq$ PEC	Classificação
				Z				
	1:1.000	A	0,27	0,053			100%	Aprovado

Fonte: O autor (2021)

Resultados semelhantes foram encontrados por Alves Júnior et al. (2015), Silva et al. (2016), Neto et al. (2017), Neto (2018), Bruch et al. (2019), ambos trabalhos utilizaram pontos de controle. Podemos observar no gráfico da Figura 51 que as discrepâncias posicionais variaram na planimetria na faixa de 0,027 m de mínima e máxima de 0,166m, já na altimetria 0,001m de mínima e máxima de 0,164 m.

Figura 51 - Discrepâncias posicionais obtidas do ortomosaico e MDS na planimetria e altimetria dos pontos do MDS utilizando PCAs com altura de 40 metros

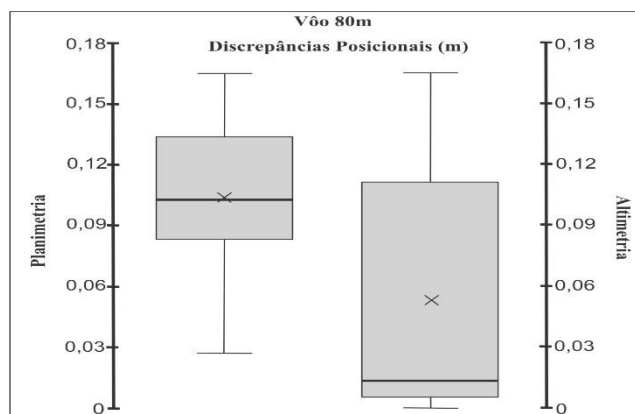


Fonte: O autor (2021)

Para a detecção de *outliers* ou diagrama de caixa, foram elaborados os *boxplots* para as discrepâncias planimétricas e altimétricas, representadas na Figura

52, onde verifica-se a inexistência de *outliers*, conferindo confiabilidade as amostras. Consequente, aplicou-se o teste estatístico de normalidade de Shapiro-Wilk ao nível de confiança de 95%, onde os resultados demonstram que a amostra é Normal ou Gaussiana.

Figura 52 - Boxplot com as discrepâncias posicionais planimétricas e altimétricas



Fonte: O autor (2021).

Verificada a ausência de *outliers*, a próxima etapa foi a aplicação do teste *t* de Student, a qual avalia as tendências de distribuição, ou seja, estimando se os resultados amostrais estão dentro do intervalo de aceitação ou rejeição. O limiar aceitável, para um nível de confiança igual a 90% ( $\alpha = 0,10$ ), ou seja,  $1 - \alpha$ , tendo como referência os 20 pontos de checagem obtidos em campo e 19 graus de liberdade, obtém-se o valor limite de  $t_{90}(19)$  tabelado igual a 1,729. Verificou-se que o  $t_{cal}$  para todos os eixos era tendencioso, sendo o  $t_{cal}$  resultante -0,866, 0,950 e 1,634, para os eixos E, N e Z, respectivamente (Tabela 29). Esses resultados demonstram sem tendênciase direcional em ambos produtos, ortomosaico e MDS, ou seja, um efeito sistemático nas posições dos produtos resultantes e avaliados nos pontos testados (Figura 53), sendo que o a direção de deslocamento planimétrico médio é de 32,93°.

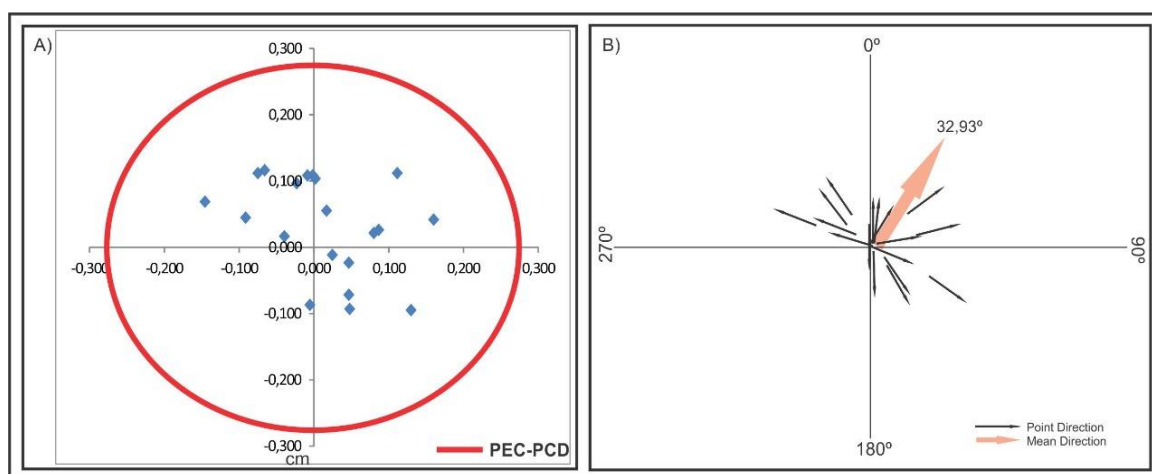
Tabela 29 - Resultado do teste t de Student e enquadramento (PCA 80m)

Planimetria e Altimetria	Amostras	t90% tabelado (t tab)	t Calculado (t cal)			Condição $t_{cal} \leq t_{tab}$	Classificação
			E	N	Z		
	20	1,789	0,866	0,950	1,634		Sem tendência

Fonte: O autor (2021).



Figura 53 - (A) Distribuição planimétrica tendenciosa dos pontos testados. (B) Vetor de direção entre a posição de referência a testada (PCA 80m).



Fonte: O autor (2021).

Visando a análise da precisão dos resultados, foi aplicado o teste Qui-Quadrado, conforme a proposta de Merchant (1982), Galo e Camargo (1994), Leal (1998), Silva e Nazareno (2009), Nazareno et al. (2009) e Côrtes (2010). Em todos os eixos, os resultados foram inferiores ao limite tabelado, sendo  $\chi^2$  7,878, 7,259 e 3,623, em E, N e Z respectivamente (Tabela 30).

Tabela 30 - Resultado do teste Qui-quadrado e enquadramento (PCA 80m)

Planimetria e Altimetria	Amostras	$\chi^2$ Tabelado	$\chi^2$ Calculado			Condição $\chi^2 \leq \chi^2$ Tabelado	Classificação
			E	N	Z		
	20	27,204	7,878	7,259	3,623		Preciso

Fonte: O autor (2021).

Por fim, calcula-se o EQM e compara-se com o EP esperado para uma determinada escala e classe PEC-PCD, no caso da planimetria e Escala (equidistância das curvas de nível) e classe PEC-PCD, no caso da altimetria. Os valores de EQM foram de 0,077m, 0,074m e 0,072m, em E, N e Z respectivamente (tabela 30). O EP planimétrica e altimétrico esperado é de 0,17m para documentos cartográficos digitais na escala 1:1.000 na classe A do PEC-PCD. Sendo assim, tanto o ortomosaico, quanto o MDS foram enquadrados como PEC-PCD Classe A (Tabela 31).

Tabela 31 - Enquadramento dos resultados do EQM (PCA 80m)

Planimetria	Escala	Classe	EP (m)	EQM Calculado		Condição EQM $\leq$ EP	Classificação
				E	N		
	1:1.000	A	0,17	0,077	0,074		Aprovado
Altimetria	Escala	Classe	EP (m)	EQM Calculado		Condição EQM $\leq$ EP	Classificação
				Z			
	1:1.000	A	0,17	0,072			Aprovado

Fonte: O autor (2021).

A validação da proposta metodológica apresentada acima foi confirmada através dos resultados do experimento, na área de estudo, onde eles foram submetidos a testes estatísticos de validação, constatando-se que tanto a qualidade posicional quanto a geométrica apresentaram distorções dentro da tolerância admitida.

A utilização do ineditismo da metodologia em usar PCAs, em aerolevantamentos, demonstra grande vantagens em áreas de difícil acesso na mineração ou, até mesmo, em grandes áreas que necessitariam grande número de pontos de controle em solo, conforme técnica mais usada e conhecida no meio da agrimensura.

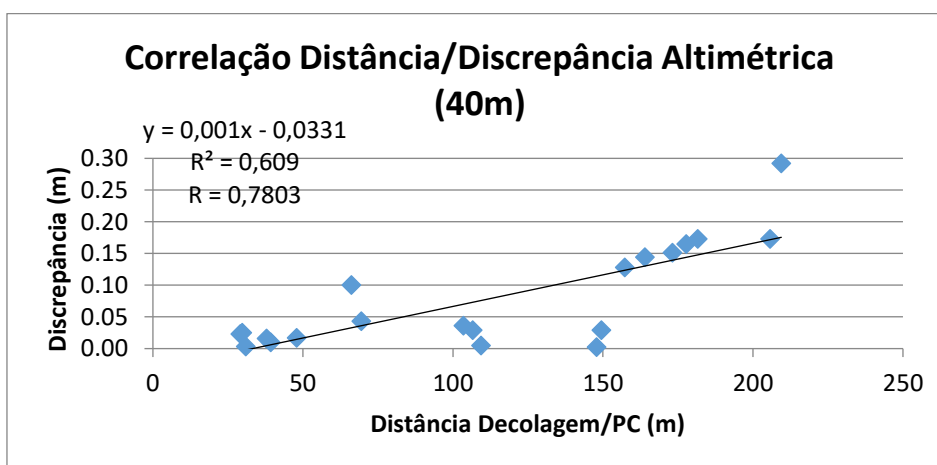
Em relação ao número mínimo de PCAs recomendados, dependerá das dimensões e topografia da área que será aplicado. Observou-se no estudo da aplicação deste método, que nos locais mais afastados dos PCAs ou locais que não há presença de PCAs, as discrepâncias foram aumentando e que não há uma relação diretamente proporcional entre planimetria e altimetria.

O estudo avaliou também a aplicação da metodologia em alturas de PCAs levantados a 40, 60 e 80m, e os resultados mostraram médias nas discrepâncias planimétricas de 0,133m, 0,132m e 0,103m respectivamente, atingindo uma discrepância média de 0,122 cm na planimétrica. Já as médias de discrepâncias altimétricas, nas alturas de Poças gerados a 40m, 60m e 80m, foram respectivamente 0,078m, 0,067m e 0,053m, concluindo que a acurácia altimétrica da metodologia proporciona, aproximadamente, 7cm. Desta forma podemos concluir que as alturas de voos, dentro dos limites testados influenciaram minimamente nos resultados, ficando a critério do usuário conforme o tamanho da área a ser levantada, portanto a metodologia atenderá pequenas, médias e grandes áreas proporcionando maior rendimento desde que seja realizado uma distribuição dos PCAs com eficácia.

Para avaliar a relação linear entre altimetria e discrepância, foi utilizada a correlação de Pearson (r) ou coeficiente que mede o grau da correlação entre duas variáveis

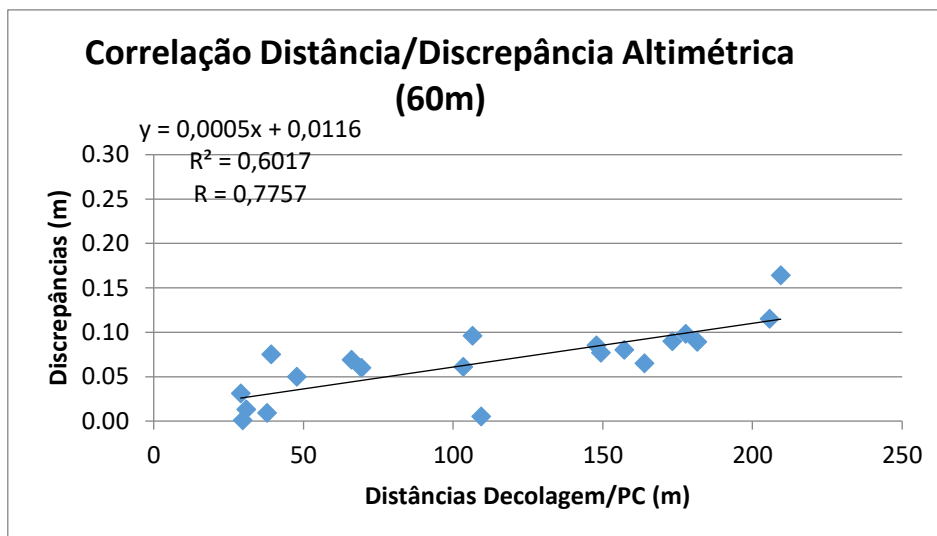
quantitativas para analisar a intensidade e a direção da relação linear (BLACK,2005). O coeficiente varia de -1 a 1. Para Cohen (1988) o sinal indica a direção inversa ou direta do relacionamento e o valor sugere a força da relação entre as variáveis. Como observado nas Figura 54, Figura 55 e Figura 56 os diagramas de dispersão nas 3 alturas realizadas nesta pesquisa levam em consideração o ponto de decolagem. Para Dancey e Reidy (2006) os valores encontrados 0,7803 (40m), 0,7757 (60m) e 0,7700 (80m) apontam para uma classificação forte, pois os r ficaram na faixa entre 0,70 a 1. Os gráficos da Figure 57, Figure 58 e Figure 59 de dispersão planimétrica apresentaram uma correlação positiva entre distância de decolagem e discrepância. Detalhadamente, isso implica que quanto mais próximo do ponto de decolagem menor será a discrepância altimétrica, pois esta posição realiza o ajuste da vertical do MDS. Desta forma, é possível compreender que o ponto de decolagem deverá estar o mais próximo do centro da área a ser mapeada.

Figura 54 - Gráfico de diagrama de dispersão altimétrica de 40m



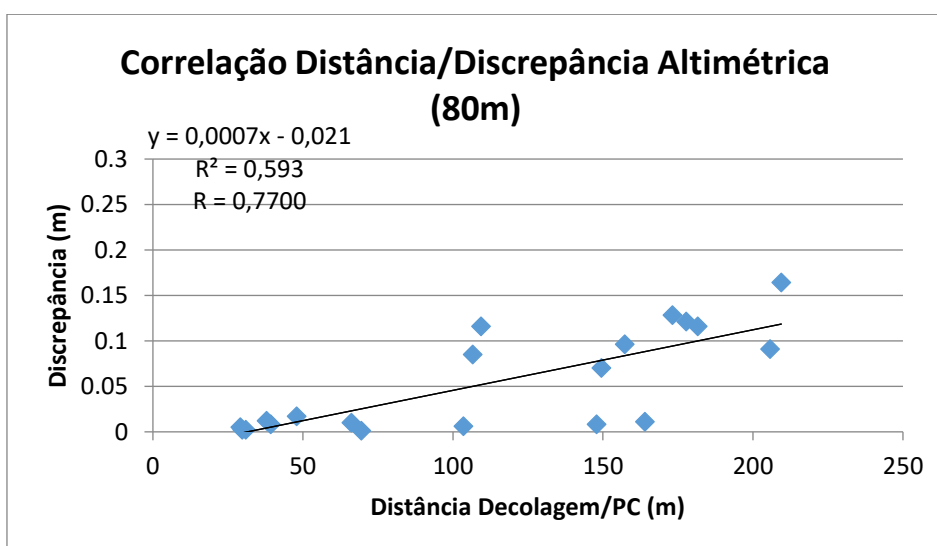
Fonte: O autor (2021)

Figura 55 - Gráfico de diagrama de dispersão altimétrica de 60m



Fonte: O autor (2021)

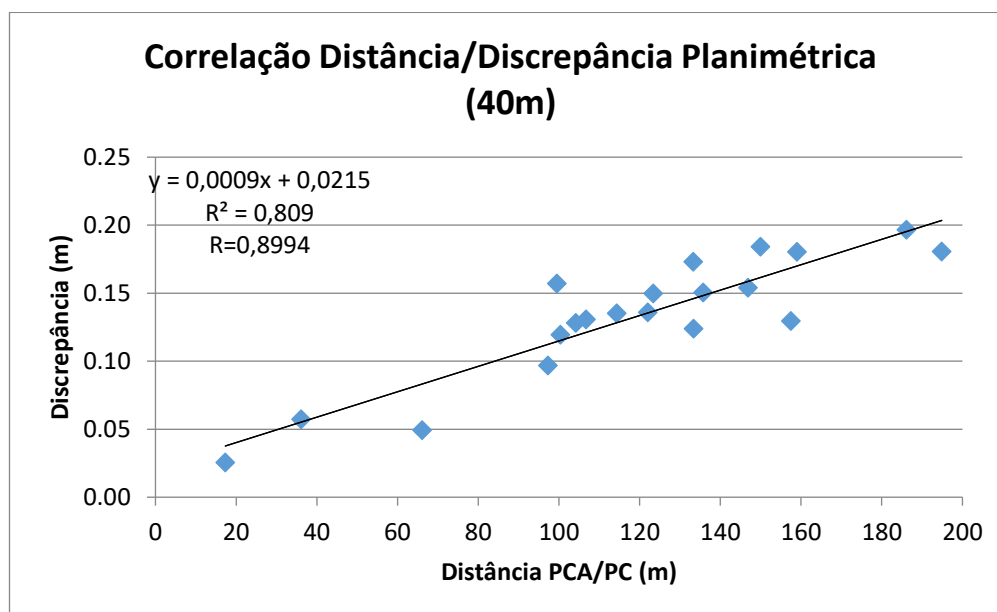
Figura 56 - Gráfico de diagrama de dispersão altimétrica de 80m



Fonte: O autor (2021)

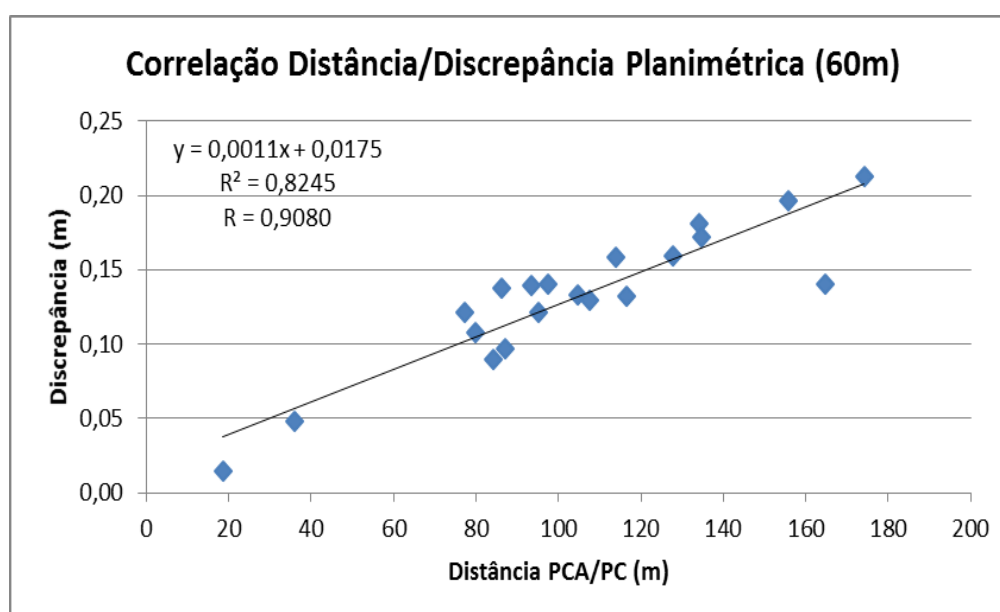
Em relação à discrepância planimétrica, foi utilizado o mesmo método de correlação, sendo que foi observada alta correlação nas 3 altitudes de PCAs. A correlação foi realizada através da medição da distância entre o *pp* dos PCAs e os pontos de checagem mais próximos. A partir dos gráficos, pode-se afirmar que quanto menor a distância dos PCAs menor a discrepância planimétrica resultante, ou seja, desta forma sugere-se uma distribuição de pontos de controle aéreos para uma melhor precisão planimétrica dos produtos gerados.

Figure 57: Gráfico de diagrama de dispersão planimétrica de 40m



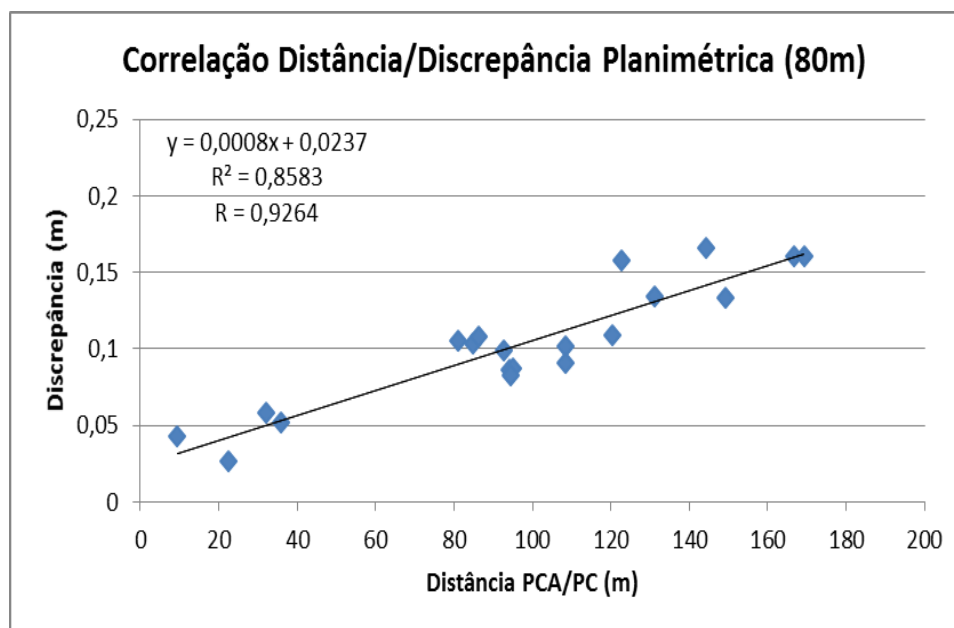
Fonte: O autor (2021)

Figure 58 - Gráfico de diagrama de dispersão planimétrica de 60m



Fonte: O autor (2021)

Figure 59 - Gráfico de diagrama de dispersão planimétrica de 80m



Fonte: O autor (2021)

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Inúmeros trabalhos vêm demonstrando a viabilidade do uso de VANT's à geração de produtos cartográficos acurados para uma determinada escala e classe.

A maior parte dos trabalhos concentra-se no método convencional, ou seja, a realização do aerolevante com VANT e o processamento fotogramétrico apoiado em pontos de controle. Esta pesquisa, em caráter inovador e inédito, realizou um aerolevante com VANT apoiado na técnica PPK, permitindo assim, a geração de modelos georreferenciados com precisões centimétricas. Essa técnica resultou em um processo menos oneroso em escala de tempo e número de técnicos em campo, portanto com um custo menor, pois desenvolveu uma forma de adaptar um receptor GNSS embarcado de baixo custo.

O embarque de um sistema criado nesta tese poderá ser replicado, desde que seja avaliado a capacidade de carga extra que cada modelo de aeronave possa transportar, buscando não interferir em sua capacidade voo com segurança. No entanto, como a aeronave usada já é de porte pequeno, a tendência é que para modelos mais robustos o embarque e a adaptação do dispositivo desenvolvido não seja problema.

Cabe destacar, primeiramente, a importância que a partir de uma boa distribuição dos pontos de checagem, foi possível validar a metodologia proposta dando confiabilidade posicional aos produtos gerados. Além disso, não foram encontrados pontos considerados *outliers*, aplicando-se o teste estatístico Shapiro-Wilk, considerando assim a amostra normal.

A média das discrepâncias planimétricas e altimétricas foram inferiores ao valor tabelado no PEC-PCD para a classe A e escala 1:1.000, assim como o desvio padrão, que apresentou resultados próximos a outros trabalhos consolidados na literatura, mas que se utilizam de vários pontos de controle em solo. Em termos de análise de tendência, os produtos gerados foram considerados não tendenciosos, pois os pontos de teste apresentaram deslocamento planimétrico praticamente unidirecional, assim como o MDS, que possui tendência positiva, entre pontos de referência e teste. No entanto a magnitude dos vieses observados não compromete a qualidade posicional do produto.

Com relação à precisão, o teste Qui-Quadrado demonstrou que o ortomosaico e o MDS apresentam alta precisão, com valores resultantes bem menores que os limites de precisão tabelados. E por fim, o EQM apresentou resultados inferiores ao EP estabelecido pela norma vigente em ambos os eixos, demonstrando a geração de um produto PEC-PCD planimétrico e altimétrico acurado para a escala 1:1.000. Sendo assim, esta pesquisa demonstrou a viabilidade do uso de um VANT adaptado e de

baixo custo para a geração de ortomosaicos e MDS na escala 1:1.000 e classe A da PEC-PCD, com alta resolução espacial.

É importante observar que na aplicação deste método PPK com PCA a partir de um levantamento com VANT, densificar e distribuir o maior número de pontos de controle aéreos para resultar em uma melhor qualidade nos produtos gerados.

Podemos concluir que alturas de coleta dos PCAs não interferem na qualidade dos produtos gerados, ficando a cargo do profissional ao aplicar a técnica levar em consideração apenas a uma melhor distribuição dos pontos. Sem o *Software Virtual Target* ficaria inviável de aplicar a metodologia, pois sem os alvos artificiais identificáveis seria impossível registrar o posicionamento do levantamento para gerar qualquer processo em um software de reconstituição de imagens.

#### 5.1 Recomendações e desenvolvimentos futuros

- Para aplicar esta metodologia, em outro modelo de VANT, deve-se projetar e adaptar suporte específico para acondicionar o receptor, antena e fonte de alimentação, sempre avaliando a capacidade de transporte de carga de cada aeronave.
- Caso ocorra a necessidade de criação de um novo sistema PPK, será necessária a atualização do software *Virtual Target*, adicionando em seu script parâmetros de antena, offset e tamanhos da imagem capturada pelo sensor. Portanto, recomenda-se adicionar um menu com as principais aeronaves do mercado a fim de facilitar o trabalho de novos usuários ao aplicar a metodologia abordada nesta tese.
- Novos usuários, ao aplicarem a metodologia em aerolevantamentos, independente do modelo da aeronave, recomendam inserir pontos de checagem para analisar erros envolvidos, além de validar o produto final.
- Ao longo dos anos de 2021 e 2022, melhorias na metodologia estão sendo desenvolvidas, como utilização de pontos extremos do plano de voo e o desenvolvimento de um aplicativo que irá automatizar a coleta de imagens dos PCAs.



## REFERÊNCIAS

---

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1994. **NBR13.133 - Execução de levantamentos topográficos**. Rio de Janeiro.

ABNT, NBR 14.166. Rede de referência cadastral municipal – procedimento. ABNT, Rio de Janeiro, 1998.

ABREU, M. A. Análise da qualidade dos dados GPS: Estudo de caso da estação de Cananéia. [Dissertação de Mestrado]. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 180 pp.

ALMEIDA, M. S., Dal Poz, W. R., 2016. **Posicionamento por Ponto Preciso e Posicionamento Relativo com GNSS: qual o método mau acurado atualmente?** Boletim de Ciências Geodésicas [online] 22. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702016000100010>. Acesso: 20 dez 2017.

ALVES, P.; AHN, Y.; LACHAPELLE, G. **The effects of network geometry on network RTK using simulated GPS data**. *Proceedings of ION GPS*, Oregon Convention Center, Portland, 2003..., p 1417 - 1427, 2003.

ALVES JR, L. R. 2015. **Análise de produtos cartográficos obtidos com câmera digital não métrica acoplada a um veículo aéreo não tripulado em áreas urbanas e rurais no estado de Goiás**. Dissertação (Mestrado). Goiânia, UFG.

ANATEL. **Portal Institucional – DADOS ANATEL**. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/institucional/ultimas-noticias>. Acesso em: 12 fev. 2020

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, ANAC. Instrução Suplementar - IS nº 21-002. Emissão de Certificado de Autorização de Voo Experimental para Veículos Aéreos Não Tripulados, 4 de outubro de 2012

ANDRADE, R. J. de O. **Determinação do desvio da vertical empregando observáveis da topografia clássica e do posicionamento por satélites**. Dissertação de mestrado em Magister Scientiae. Viçosa: UFV, 2008.

AZAMBUJA, J. L. F. 2015 **Potencialidades de serviços ON-LINE de Posicionamento por Ponto Preciso em aplicações geodésicas: uma análise envolvendo longo período de dados das estações da RBMC**. Tese (Doutorado) Porto Alegre, UFRGS.

BALANIS, C. A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 3th. Ed. Hoboken. John Wiley & Sons, Inc. 2005, 1073 p.

BLACK, Willian C. (2005), **Análise Multivariada de Dados**. Porto Alegre, Bookman

BRITO, J; Coelho, L. **Fotogrametria Digital**. Instituto Militar de Engenharia, 2002.

BRUCH, A. F.; CIROLINI, A.; THUM, A. B.; CARNEIRO, M. **Avaliação da Acurácia das Cubagens de Volumes de Mineração através de Levantamentos Convencionais e Fotogramétricos.** Revista Brasileira de Geografia Física, v. 12, n. 1. p. 283-298, 2019. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.1.p283-298>

CARDEIRA, B.; BALTAZAR, F. **Arquitecturas para sistemas de navegação INS / GPS com aplicação a um helicóptero autônomo.** Relatório de Trabalho Final de Curso, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2004.

CHEN, X. et al. **Antennas for Global Navigation Satellite Systems.** Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2012.

CHIANUCCI, F., DISPERATI, L., GUZZI, D., BIANCHINI, D., NARDINO, V., LASTRI, C., RINDINELLA, A., CORONA, P., 2016. **Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV.** *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [online] 47. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.12.005>. Acesso: 10 jun. 2017.

CHUJO, A. M. Tecnologias de navegação aérea por GNSS e DGNSS para operação CNS/ATM: Aplicações no Brasil. Tese (doutorado). ITA: São José dos Campos, SP, 2007.

CONCAR. **Especificação Técnica Para A Aquisição De Dados Geoespaciais Vetoriais.** Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais. 2.ed. Exército Brasileiro – CONCAR-EB Brasil. 2011.

COHEN, Jacob. (1988), **Statistical power analysis for the behavioral sciences.** Hillsdale, NJ, Erlbaum.

COZZENS, T. **Broadcom launches dual-frequency GNSS receiver for mass market: GPS World.** Disponível em: <http://gpsworld.com/broadcom-launches-dual-frequency-gnss-receiver-for-mass-market/>. Acesso em: 15 mar. 2020.

DAL'FORNO, G. L., SAMPAIO, M. I. R., AGUIRRE, A. J., HILLEBRAND, F. L., 2009. **Levantamento Planialtimétrico no plano topográfico local: estudo comparativo dos resultados obtidos a partir de métodos geodésicos e topográficos.** *GAEA – Journal of Geoscience.* [online] 5/2. Disponível: <https://doi.org/10.4013/gaea.2009.52.01>. Acesso: 20 dez. 2017.

DAWSON, R. **How Significant Is A Boxplot Outlier.** *Journal of Statistics Education*, v. 19, n. 2, p. 1–13, 2011.

DANCEY, Christine & REIDY, John. (2006), **Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows.** Porto Alegre, Artmed.

ELIAS, E. N. N., MIRANDA, P. C. A., CUNHA, A. A., FERNANDES, V. O., 2017. **Aplicação do Padrão de Exatidão Planimétrica para produtos cartográficos digitais (PEC-PCD)**. Geonordeste, Salvador. (Anais do Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto).

EL-MOWAFY, A. Performance Analysis of the RTK Technique in an Urban Environment. The Australian Surveyor, Vol.45, n.1, 2000.

ESPOSITO, G., MASTROROCCO, G., SALVINI, R., OLIVETI, M., STARITA, P., 2017. **Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy**. Environ Earth Sci [online] 76. Disponível: <https://doi-org.ez66.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s12665-017-6409-z> Acesso: mar. 2018.

FARRET, J.C. et. Al. **Performance and Analysis of a L1-C/A Code Smoothing Receiver Under Field Conditions of Land reform In Brazil**. ION 63<sup>rd</sup> Annual Meeting, April 23-25 2007, Cambridge, Massachussetts

FARRET, J.C. Tese de doutorado, **O efeito do multicaminho estático nas medidas da fase das Portadoras GPS**, Farret, 2000

FERREIRA, T. R., 2017. **Volume útil de pilha de granel com retomada inferior**. Dissertação (Mestrado). Ouro Preto, UFOP.

FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A. **Curso de Estatística**. 3. ed, São Paulo: Atlas, 1982. 286 pp.

FREIBERGER JUNIOR, J. **ANTENAS DE RECEPTORES GPS: CARACTERÍSTICAS GERAIS**. Curitiba: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2004. Material teórico de apoio ao Curso de Extensão – Setor de Ciências da Terra – Departamento de Geomática.

GALO, M., CAMARGO, P. O., 1994. **Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas**. UFSC, Florianópolis. (Anais do Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, 01).

GUANDALINI, MARCOS. Dissertação de Mestrado. **Análise metodológica do posicionamento relativo através do GNSS e suas aplicações na engenharia: Uso da técnica RTK/GSM**. São Paulo, 212. 211 p.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba: Editora da UFPR, 1994.

GONZALES-MANTESANZ, F.J.; QUIROS, R.; CANO M. y DALDA. A. **Posicionamiento GPS em tiempo real a través de Internet**, FUREF-IP. Instituto

Geográfico Nacional. VII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía, TOPCART, 2004.

HEIN, G. **From GPS and GLONASS via EGNOS to GALILEO** – Positioning and Navigation in the Third Millennium. GPS Solutions 39-47

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more.** Vienna. Springer- Verlag Wien, 2008. 518 p.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** 2017. Manual do Usuário: Aplicativo Online IBGE-PPP. Brasília.

IGS INFRASTRUCTURE COMMITTEE, RINEX WORKING GROUP, MULTI-GNSS EXPERIMENT. **IGS RINEX 3 Transition Plan v3.0.** 2015, 17 p.

INCRA. **Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais.** 2ª Edição. 2010. 86 p.

INCRA. **Manual Técnico de Posicionamento para Georreferenciamento de Imóveis Rurais – 2013**

JORGE, L. A. C. **Metodologia para Utilização de Aeromodelos em Monitoramento Aéreo: Análise de Imagens.** Embrapa, São Carlos, 2003.

KURKOV, V. M.; KISELEVA, A. S. **DEM Accuracy Research Based On Unmanned Aerial Survey Data.** In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Volume XLIII-B3-2020, **Anais XXIV ISPRS Congress 2020** edition. p. 1347-1352.

LEANDRO, Rodrigo F.; SANTOS, Marcelo C.; LANGLEY, Richard B. **Analyzing GNSS data in precise point positioning software.** GPS solutions, v. 15, m. 1, p. 1-13, 2011.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying.** John Wiley & Sons: Toronto, Canadá, 1990.

LINHARES, M. M. DE A., 2016. **Uso de veículo aéreo não tripulado na determinação de Índice de vegetação em área de pastagem em Nova Mutum-MT.** Dissertação (Mestrado). Goiânia, UFG.

LIZARAZO, I., ANGULO, V., RODRÍGUES, J., 2017. **Automatic mapping of land surface elevation changes from UAV-based imagery.** *Internacional Journal of Remote Sensing* [online] 38. Disponível: <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1278313>. Acesso: 15 jan. 2018.

LORENZZETI, J. A. **Princípios físicos de sensoriamento remoto.** São Paulo: Blucher, 2015.

LOWE D. G., **Distinctive Image Features from Scale Invariant**. International Journal of Computer Vision, 2004. 28 p.

MATTHES, E. **Curso Intensivo de Python. Uma Introdução Prática e Baseada em Projetos à Programação**. NOVATEC, São Paulo, SP. 2017.

MEDEIROS, F.A. **Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em agricultura de precisão**, 2007. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

MENEZES, R. R. V.; LISBOA, M. H. M.; SANTOS, A. P.; DIAS, J. S. Avaliação da acurácia planimétrica das imagens do Google Earth para produção de base cartográfica. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 71. n. 2. p. 367-391. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv71n2-46327>

MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. **Indexing based on scale invariant interest points**. In: International Conference on Computer Vision; July 2001; Vancouver, Canadá. Piscataway: IEEE; 2001. p. 525-531.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: UNESP, 2000.

MONICO, J. F. G., 2008. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicação**, 2ª edição. Ed. da UNESP, São Paulo.

MOUTINHO, O. **Evaluation of Photogrammetric Solutions for RPAS: Commercial vs Open Source**. 2015. 120f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Geográfica, Universidade Do Porto, Porto, 2015.

MUNARETTO, L. A. C., 2017. **VANT e DRONES: A aeronáutica ao alcance de todos**. 2ª edição. Ed. Independente, São José dos Campos.

NETO, F. D. F. **Avaliação da Acurácia Posicional de Ortofotos Geradas por SISVANT**. 2018. 104p. Tese (Doutorado em Ciências). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFV, Viçosa, 2018.

RIBEIRO JÚNIOR, 2011. **Determinação de volumes em atividades de mineração utilizando ferramentas do sensoriamento remoto**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Tese de Doutorado, 161p.

SATIRAPOD & WANG, 2000. **Comparing the quality indicators of GPS carrier phase observations**. Geomatics Res. Australas., 73 (2000), pp. 75-92

SANTOS. A. P., RODRIGUES, D. D., SANTOS, N. T., GRIPP JR. J., 2016. **Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais utilizando técnicas de estatística espacial: proposta de método e exemplo utilizando a norma brasileira**. Boletim

de Ciências Geodésicas [online] 22/4. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702016000400036>. Acesso: 10 jun. 2017.

SANTOS, L. F. B., 2016. **Avaliação de modelo digital de terreno gerado através de VANT em planícies pantaneiras**. Monografia (Graduação). Cuiabá, UFMT.

SCHWERTMAN, N. C.; OWENS, M. A.; ADNAN, R. **A simple more general boxplot method for identifying outliers**. *Computational Statistics and Data Analysis*, v. 47, n. 1, p. 165–174, 2004.

SEEBER, G. *Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications*. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 612p. 2003.

SEVERANCE, C. **Python for Informatics**. Exploring Information. Version 2.7.3, 2009.

SILVA, A. M. **Curso de Processamento Digital de Imagens**. Apostila. Porto Alegre: XX Congresso Brasileiro de Cartografia, 2000.

SILVA, C. A., 2015. **Avaliação da acurácia dos ortomosaicos e modelos digitais do terreno gerados por vant e sua aplicação no cálculo de volume de pilhas de rejeito da pedra cariri**. Dissertação (Mestrado) Fortaleza, UFC.

SILVA, Irineu da; SEGANTINE, Paulo C.I. **Topografia para Engenharia: Teoria e Prática de Geomática**. São Paulo; 2015.

SILVA, E. S. **Utilização de ortofotocartas digitais no sistema de gerenciamento de redes da distribuição – CEMIG**. Monografia do Curso de Especialização em Geoprocessamento – Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

PYTHON. **Python Software Foundation**. Disponível em: <<https://www.python.org/>>. Acesso: 01 de fevereiro de 2019.

PETTINATTI, F. **Modelamento Digital de Terreno e Representação Gráfica de Superfície**. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP. São Paulo, 1983.

PERONI, R. **Relatório de Pós-doutorado, Aplicações de mapeamento e modelagem de terreno com uso de VANT's em áreas de mineração**. Florianópolis: [s.n.], 2016. 136 p. Citado na página 50.

OLIVEIRA, F. **Brasil-China – 20 Anos de Cooperação Espacial. CBERS – O Satélite da Parceria Estratégica**. São Carlos, SP: Editora Cubo, 2009.

TADDIA, Y.; STECCHI, F.; PELLEGRINELLI, A. **Coastal Mapping Using DJI Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic Mode**. *Drones*, v. 4, n. 9, p. 1-19, 2020.

TOMASTÍK, J.; MOKROS, M.; SUROVY, P.; GRZNÁROVÁ, A.; MERGANIC, J. **UAV RTK/PPK Method-An Optimal Solution for Mapping Inaccessible Forested Areas? Remote Sens**. V. 11, p. 721. 2019.

ZANETTI, M, A, Z. **Implicações atuais no relacionamento entre sistemas terrestres de referência de origem local e geocêntrica.** Tese de doutorado em ciências geodésicas. Curitiba: UFPR, 111 p. 2006.

YU, J. J.; KIM, D. W.; LEE, E. J.; SON, S. W. **Determining the Optimal Number of Ground Control Points for Varying Study Sites through Accuracy Evaluation of Unmanned Aerial System-Based 3D Point Clouds and Digital Surface Models.** *Drones*, v. 4, n. 3, P. 49. 2020. doi:10.3390/drones4030049

ZHANG, H.; ALDANA-JAGUE, E.; CLAPUYT, F.; WILKEN, F.; VANACKER, V.; VAN OOST, K. **Evaluating the potential of post-processing kinematic (PPK) georeferencing for UAV-based structure-from-motion (SfM) photogrammetry and surface change detection.** *Earth Surface Dynamics*. v. 7, p. 807–827. 2019.

ZHOU, Y.; DAAKIR, M.; RUPNIK, E.; PIERROT-DESEILLIGNY, M. A **two-step approach for the correction of rolling shutter distortion in UAV photogrammetry.** *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 160, p. 51–66. 2020. doi:10.1016/j.isprsjprs.2019.11.020

ZHOU, Y.; RUPNIK, E.; MEYNARD, C.; THOM, C.; PIERROT-DESEILLIGNY, M. **Simulation and Analysis of Photogrammetric UAV Image Blocks - Influence of Camera Calibration Error.** *Remote Sensing*, v. 12. n. 1. p. 22. 2019. doi:10.3390/rs12010022

## **ANEXO I**

### *Script do software Virtual Target*

```
#mport imagens
from tkinter import *
from PIL import Image
```

```

from pylab import array
from matplotlib import pyplot as plt
import os
import piexif

saida = []
lista = {}

janela = Tk()

def visualizacao(codigo):
    cod = (int)(codigo)
    listaSaida = os.listdir('Saida/')
    im = array(Image.open('Entrada/' + listaSaida[cod-1]))
    y = (int)(im.shape[0] / 2)
    x = (int)(im.shape[1] / 2)
    #x = [2736]
    #y = [1824]
    plt.title(listaSaida[cod-1] )
    plt.plot(x, y, 'r+') # PLOTA UMA LINHA OU POLIGONO CONFORME A SEQUENCIA DA LISTA X E Y
    plt.imshow(im)
    plt.show()
    pass

def visualizar(lista):
    planilha = ""
    tamanho = len(lista)
    tamanho = tamanho * 18 + 20
    profundidade = (str)(tamanho)
    janela2 = Tk()

    janela2.title('LISTA DE FOTOS PROCESSADAS ')
    janela2.geometry("300x"+profundidade+"405+100")
    cont = 1
    for i in lista:
        x = ""
        for j in range(len(i)):
            x += i[j]
        x += '      Código: '+str(cont)
        planilha += ('{}\n'.format(x))
        cont +=1

    lb8 = Label(janela2, text=planilha)
    lb8.place(x=20, y=10)
    janela2.mainloop()

def relatorioFotos(cont):
    lb4["text"] = 'Total de fotos processadas ' + str(cont)
    lb5["text"] = ' Processamento concluído insira o código'
    for i in saida:
        #print(i)
    pass
    pass

def leitura():
    lista = os.listdir('Entrada/')

    cont = 1
    for i in lista:
        #im = io.imread('Entrada/'+i)
        im = array(Image.open('Entrada/' + i))

```



```

image = Image.open("Entrada/" + i)
exif_dict = piexif.load(image.info["exif"])
if cont == 0:
    for j in range(im.shape[0]):
        for z in range(im.shape[1]):
            print(exif_dict[j][z]['GPS'])

#print(im[1])
x = (int)(im.shape[0] / 2)
y = (int)(im.shape[1] / 2)
im[x-8:x+8, y] = (255, 0, 0)
im[x, y-8:y+8] = (255, 0, 0)
plt.imshow('temp/' + i, im)

image2 = Image.open("temp/" + i)
exif_bytes = piexif.dump(exif_dict)
image2.save('Saida/' + i, exif=exif_bytes)
os.remove('temp/' + i)
print(cont, ' ', len(i), ' ', x, ' ', y, ' shape temp ', im.shape, ' ')
cont += 1
relatorioFotos(cont-1)
visualizar(lista)

def bt_1():
    lb4["text"] = 'Processando'
    leitura()
    pass

def bt_2():
    foto = a.get()
    visualizacao(foto)

lb0 = Label(janela, text="PROCESSAMENTO DE IMAGENS")
lb0.place(x= 60, y=20)

lb1 = Label(janela, text="Fotos a serem processadas na pasta Entrada")
lb1.place(x= 20, y=50)

lb2 = Label(janela, text="Executar a criação dos alvos")
lb2.place(x= 20, y=90)

lb3 = Label(janela, text="Fotos salvas na pasta Saida")
lb3.place(x= 20, y=130)

lb4 = Label(janela, text="")
lb4.place(x= 20, y=170)

lb5 = Label(janela, text="Aguarde processamento para inserir o código")
lb5.place(x= 30, y=210)

a = Entry(janela)
a.place(x=80, y=240)

bt1 = Button(janela, text=' Processar ', command=bt_1)
bt1.place(x=210, y=90)

bt2 = Button(janela, text=' visualizar foto ', command=bt_2)
bt2.place(x=100, y=280)

```

```
foto = PhotoImage(file = "GSLogo.png")
lbim1 = Label(janela,image=foto)
lbim1.place(x=30,y=380)

janela.title('Virtual Target 1.0')
#janela["bg"] = "black"
janela.geometry("300x450+100+100")

janela.mainloop()
```