

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL

DIEGO WILLIAN DE WITTE

**ESTUDO DE CASO: RESULTADOS AEROFOTOGRAMÉTRICOS
OBTIDOS COM VANT DE BAIXO CUSTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

DIEGO WILLIAN DE WITTE

**ESTUDO DE CASO: RESULTADOS AEROFOTOGRAMÉTRICOS
OBTIDOS COM VANT DE BAIXO CUSTO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado às disciplinas de TCC-1 e TCC-2, do Curso de Engenharia de Produção Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba – UTFPR/CT, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jair Ferreira de Almeida

CURITIBA

2016



Ministério da Educação

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Campus Curitiba – Sede Ecoville
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Curso de Engenharia de Produção Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO DE CASO: RESULTADOS AEROFOTOGRAMÉTRICOS OBTIDOS COM VANT DE BAIXO CUSTO

Por

DIEGO WILLIAN DE WITTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 21 de novembro de 2016, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – Jair Ferreira de Almeida, Dr.
UTFPR

Profa. Clarice Farian de Lemos, Dra.
UTFPR

Profa. Janine Nicolosi Corrêa, Dra.
UTFPR

Primeiramente dedico a Deus, nosso Senhor, que deu bases para a elaboração deste trabalho acadêmico.

Aos meus pais Maria Ines e Joel Joaquim que são as bases e a razão por todo esse esforço.

Ao meu irmão Marcos Roberto que foi, é e sempre será meu modelo de pessoa íntegra e batalhadora.

À Ana Carla Puerari que é a minha alegria e inspiração para viver dia após dia.

A meus familiares que foram coadjuvantes na obtenção deste objetivo.

A todos os meus amigos que me acompanharam nessa luta, fortalecendo-me com palavras incentivadoras, e pela confiança que creditaram em meus esforços para a elaboração deste trabalho de conclusão de curso.

AGRADECIMENTOS

Certamente não há como se lembrar de todas as pessoas importantes que me apoiaram e auxiliaram durante esse processo de evolução e extrema dedicação pelo qual me sujeitei a vencer. Mas agradeço a todos que fizeram parte desta conquista. Aos meus professores que com suas palavras de incentivo e conhecimento fizeram parte do profissional que sou, a cada um deles uma fração do meu conhecimento é dedicada. Um agradecimento especial para o Professor Mauro Edson Alberti, que com sua dedicação e bondade tornou-se um amigo o qual pretendo levar pelo resto da vida. Agradeço ao meu orientador Jair Ferreira de Almeida e ao meu amigo e colega Gustavo Chien que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos e colegas que compartilharam a experiência acadêmica do intercâmbio nos EUA e que foram minha família durante aquele período. Também agradeço meus amigos de Curitiba, os PPÓh's, que fazem valer a pena viver cada momento nesta Cidade.

Agradeço também ao Professor Ray Lemming do Illinois Institute of Technology – Chicago, o qual me apresentou aos VANTs e à suas atividades no ramo da construção civil. Agradeço à Professora Kay Dickerson da Missouri Western State University – Saint Joseph, a qual foi protagonista no meu desenvolvimento durante meu intercâmbio acadêmico. Agradeço aos professores estrangeiros que me ensinaram a ciência de uma forma diferente, e que se esforçaram e tiveram toda a paciência para transmitir seus conhecimentos para um aluno estrangeiro.

Deixo meu agradecimento também aos profissionais e futuros profissionais que leem esse trabalho de conclusão de curso. Espero que tal obra possa ajudar na disseminação do conhecimento nessa área de estudo.

Every end is a new beginning...

Assim diz o Senhor: “Eu te coloquei no deserto para saber o que existia em seu coração.” (Deut. 8:02.)

RESUMO

DE WITTE, Diego Willian. **Estudo de Caso: Resultados Aerofotogramétricos Obtidos com VANT de Baixo Custo**. 2016. 135 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção Civil) – Departamento Acadêmico de Construção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

A aerofotogrametria obteve um avanço em sua aplicabilidade após a utilização dos VANTs no processo de obtenção de dados. Esses equipamentos podem tornar viável a utilização da aerofotogrametria para o mapeamento de áreas urbanas e pequenas áreas rurais, pois adquirem resultados rapidamente e mais detalhados que a topografia convencional, facilitando a tomada de decisão dos profissionais envolvidos. O mapeamento aéreo é dividido em três fases: planejamento do voo, aquisição e processamento de dados. Pela integração dos componentes do SNT podem ser gerados os MDEs e as ortofotos que são os produtos finais do mapeamento aéreo. Este estudo analisa os resultados de um mapeamento aéreo realizado no estacionamento da UTFPR – Curitiba, sede Ecoville, com a utilização de um VANT de baixo custo, Phantom 3 *Advanced*, com foco na análise dos resultados obtidos dos erros das medidas dos MDEs comparadas às medidas absolutas obtidas por uma estação total. Os resultados do sistema proposto são comparados aos resultados obtidos por VANTs específicos para a atividade de mapeamento aéreo. Sabendo-se das limitações do equipamento, os resultados obtidos pelos levantamentos foram satisfatórios quando comparados aos obtidos com equipamentos mais sofisticados e de maiores custos.

Palavras-chave: VANT. Mapeamento aéreo. Pontos de controle. Georreferenciamento. Modelo Digital de Elevação. Estação Total.

ABSTRACT

DE WITTE, Diego Willian. **Case: Aerial photogrammetric results acquired by Low Cost UAVs**. 2016. 135 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção Civil) – Departamento Acadêmico de Construção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

The aerial photogrammetry field became more popular after UAVs began to be used for data collection purposes. UAVs can make photogrammetry uses more popular than never by spreading its utilization to urbanization tasks and surveying of small rural areas. These mini aircrafts can obtain faster and more detailed results than the conventional surveying methods, making easier for the stakeholders to take a decision. The mapping activity is divided in three areas: flight planning, data acquisition and processing. By the component's system integration it's possible to generate the DEMs and the orthophotos which are the final products of the mapping activity. This study analyzes the outcomes of an aerial surveying activity performed at the parking lot of the Federal University of Technology – Paraná, Curitiba, by an UAV Phantom 3 Advanced, focusing on the results of error analysis and dispersion comparing the georeferenced control points measured by the RTS and its calculated position on the DEM. In addition, the study presents six cases on uses of UAVs for construction tasks, describes the procedures to generate the models, defines the ideal control points' quantity to be used on the test bed area, and compares the generated results with the case studies. Considering the UAV system limitations, the outcomes obtained in this research were satisfactory when compared to the results obtained by more sophisticated and costly equipment pieces.

Keywords: UAV. Aerial Surveying. Control Points. Georeferencing. DEM. RTS.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil
C/A (código) – *Course* ou *Acquisition*
CMA – Certificado Médico Aeronáutico
DEM – *Digital Elevation Model*
DOD – Departamento de Defesa Americano
DSG – Diretoria de Serviço Geográfico do Exército
EJECart – Empresa Junior de Engenharia Cartográfica da Universidade Estadual Paulista
GLONASS – *Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema*
GNSS – *Global Navigation Satellite System*
GPS – Sistema de Posicionamento Global
GRASS – *Geographic Resource Analysis Support System*
GSD – *Ground Sample Distance*
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
IRNSS – *Indian Navigation Satellite System*
ISPRS – *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*
ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica
JPEG – *Joint Photographic Experts Group*
MDD – *Model Driven Development*
MDE – Modelo Digital de Elevação
MDS – Modelo Digital de Superfície
MDT – Modelo Digital do Terreno
MKFPT – *Mikrokopter Flight Planning Tool*
NAVSTAR – *Navigation Satellite with Time and Ranging*
P (código) – *Precise* ou *Protected*
PRN – *Pseudo Random Noise*
QZSS – *Quasi-Zenith Satellite System*
REM – Radiação Eletromagnética
RGB – *Red, Green, Blue*
RMS – *Root Mean Square*

RTK – *Real Time Kinematic*

RTS – *Robotic Total Station*

SAGA – *System for Automated Geoscientific Analyses*

SANT – Sistema Aéreo Não Tripulável

SGB – Sistema Geodésico Brasileiro

SGBD – Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados

SIG – Sistema de Informação Geográfica

UAV – Unmanned Aerial Vehicles

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

UTM – Universal Transversa de Mercator

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulável

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Precisão das Técnicas de Posicionamento	27
Tabela 2 – Precisão da Técnica de Posicionamento Relativo	27
Tabela 3 – Classes de Acordo com a Precisão Planimétrica (“P”) Após Ajustamento	31
Tabela 4 – Nível de Acurácia Após Ajustamento	31
Tabela 5 – Poligonais Geodésicas de Precisão (Controle Básico).....	33
Tabela 6 – Poligonais Geodésicas de apoio à Demarcação (Controle Imediato).....	34
Tabela 7 – Comparação de Vantagens e Limitações dos Sistemas de Voo Existentes	70
Tabela 8 – Comparativo entre Parâmetros do Levantamento	78
Tabela 9 – Comparativo entre Dados de Processamento do Levantamento	81
Tabela 10 – Comparativo entre os Resultados Volumétricos.....	84
Tabela 11 – Cálculo de Volume pela Estação Total e pelo VANT.....	92
Tabela 12 – Especificações Técnicas Phantom 3 <i>Advanced</i>	99
Tabela 13 – Especificações Técnicas Leica TS06 <i>Plus</i>	100
Tabela 14 – Dados Coletados pela Estação Total	105
Tabela 15 – Coordenadas Georreferenciadas em UTM dos Pontos de Interesse ..	106

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação de Estações Totais	21
Quadro 2 – Requisitos Mínimos Recomendados para o Sistema	73
Quadro 3 – Custo dos <i>Softwares</i> de Processamento.....	74
Quadro 4 – Erros Apresentados nos Pontos de Verificação	91
Quadro 5 – Erro Relativo Axial de Georreferenciamento	95
Quadro 6 – Comparação de Medidas dos Segmentos.....	96
Quadro 7 – Comparativo entre Erros	97
Quadro 8 – Média dos Erros de Cada Modelo	97
Quadro 9 – Especificações Técnicas do Laptop	102
Quadro 10 – Pontos de Verificação e Acurácia Absoluta do Modelo	112
Quadro 11 – Diferentes Pontos de Controle para o Georreferenciamento.....	114
Quadro 12 – Configuração para 2 Pontos de Controle	115
Quadro 13 – Configuração para 3 Pontos de Controle	116
Quadro 14 – Configuração para 4 Pontos de Controle	116
Quadro 15 – Média e Desvio Padrão de Cada Eixo para Diferentes Pontos de Controle.....	117
Quadro 16 – Comparativo entre Resultados	117
Quadro 17 – Comparativo entre Acurácias e GSDs.....	119
Quadro 18 – Comparação entre Medidas do Modelo Apoiado por 3 Pontos de Controle.....	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estação Total Série Top Gun DTM 400	18
Figura 2 – Levantamento (Método Polar)	19
Figura 3 – Exemplo do Método Polar	20
Figura 4 – Triangulação Entre Receptor GPS e Satélites	23
Figura 5 – Planos Orbitais e Suas Características	24
Figura 6 – Receptor GPS de Alta precisão.....	26
Figura 7 – Método Diferencial (RTK).....	28
Figura 8 – Procedimento de Campo pelo Método RTK.....	28
Figura 9 – Comparação entre Acurácia e Precisão.....	30
Figura 10 – Representação de dados em um SIG	38
Figura 11 – Cobertura de Área por Ferramenta de Clipe	38
Figura 12 – Área de atingimento por Ferramenta de Calota	39
Figura 13 – Representação de Vetores em um SIG.....	40
Figura 14 – Representação de <i>Raster</i> Contínuo.....	41
Figura 15 – Representação de <i>Raster</i> Discreto	41
Figura 16 – Representação das Diferentes Camadas de Dados	43
Figura 17 – Arquitetura dos Componentes de um SIG.....	44
Figura 18 – Características de um SIG	45
Figura 19 – Relações do SIG com quatro outros sistemas	47
Figura 20 – Comportamento dos Materiais Sobre o Espectro Eletromagnético	49
Figura 21 – Espectro das Ondas Eletromagnéticas Segundo seu Comprimento.....	51
Figura 22 – Interação da Energia Eletromagnética com o Objeto	51
Figura 23 – Imagem de Radar.....	52
Figura 24 – Composição de Bandas	53
Figura 25 – Resolução Espacial de Imagens por Satélites	55
Figura 26 – Exemplo de Restituído Analítico.....	57
Figura 27 – A Estrutura de Pixels Existente na Imagem	58
Figura 28 – Distribuição Matricial (à Direita) Equivalente a um Conjunto de Pixels (à Esquerda).....	58
Figura 29 – Esquema de Voo (Recobrimento Longitudinal 60% e Lateral 30%).....	59
Figura 30 – Ponto Principal e Conjugado de uma Aerofoto	60
Figura 31 – Croqui do Plano de Voo	61
Figura 32 – Pontos de Ligação de Imagens para um Bloco Utilizando uma Câmera Digital	62
Figura 33 – Faixas de Rastreamento e Pontos de Controle.....	62
Figura 34 – Exemplo de Tamanhos de GSD.....	63
Figura 35 – Pontos de Controle Natural do Terreno.....	64
Figura 36 – Ponto de Controle Artificial.....	65
Figura 37 – Exemplo de Modelo Digital de Superfície.....	67
Figura 38 – Exemplo de Modelo Digital do Terreno	67
Figura 39 – Ortofoto em 3D da Av. Paulista, em São Paulo.....	68
Figura 40 – Comparativo entre Imagens na Projeção Cônica e Ortogonal	68
Figura 41 – Principais Componentes de um Sistema VANT	71
Figura 42 – Restrições Impostas aos VANTs.....	75
Figura 43 – Representação Gráfica de Erros Absolutos em Estacionamento.....	79

Figura 44 – Comparação entre Resultados Gerados pelo Receptor GPS-RTK (A) e pelo VANT (B)	80
Figura 45 – Área de Análise dos Resultados	82
Figura 46 – Erro Altimétrico Absoluto (em Metros) entre os Levantamentos	83
Figura 47 – Trecho de Corte e Aterro para Obra de Ferrovia	85
Figura 48 – Seção Transversal da Ferrovia	86
Figura 49 – Representação de Áreas a Serem Corrigidas Conforme Limite Estipulado.....	87
Figura 50 – Produtos Gerados pelo Processamento de Dados Aerofotogramétricos	88
Figura 51 – Cálculo de Quantidade de Material a Ser Movido – MDE	88
Figura 52 – Poligonal Fechada.....	89
Figura 53 – Batmap.....	90
Figura 54 – Modelo Digital de Superfície da Área Estudada.....	92
Figura 55 – Resumo Comparativo entre os Resultados.....	93
Figura 56 – Pontos de Controle.....	94
Figura 57 – Segmentos de Aferição de Medidas.....	95
Figura 58 – Sobreposição das Ortofotos.....	96
Figura 59 – Phantom 3 <i>Advanced</i>	99
Figura 60 – Leica TS06 <i>Plus</i>	101
Figura 61 – Localização Regional do Local de Estudo.....	103
Figura 62 – Local de Estudo.....	104
Figura 63 – Pontos de Interesse para Georreferenciamento	105
Figura 64 – Plano de Voo.....	108
Figura 65 – Pontos de Captura de Imagem	108
Figura 66 – Resumo dos Parâmetros do Planejamento de Voo.....	110
Figura 67 – Fluxograma do Processo de Mapeamento.....	111
Figura 68 – Nuvem de Pontos e Pontos de Controle	115
Figura 69 – Opções para Referência de Cota.	120
Figura 70 – Modelo Digital de Superfície	123
Figura 71 – Modelo Digital do Terreno	124
Figura 72 – Comparação entre diferentes MDS.	125
Figura 73 – Seção da Ortofoto Gerada pelo Programa	125
Figura 74 – Detalhamento de Alvo Utilizado para Ponto de Controle	126

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO GERAL.....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3 JUSTIFICATIVA	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 TOPOGRAFIA.....	17
2.1.1 Estação Total.....	17
2.1.2 Sistema GNSS	21
2.1.3 Recomendações para Levantamentos Georreferenciados	29
2.2 GEOMÁTICA.....	34
2.2.1 Geodésia	35
2.2.2 Geoprocessamento	36
2.2.3 Sistema de Informação Geográfica.....	37
2.2.4 Sensoriamento Remoto.....	48
2.3 FOTOGRAMETRIA	56
2.3.1 Estereoscopia.....	59
2.3.2 Recobrimento	59
2.3.3 Aerotriangulação	60
2.3.4 <i>Ground Sample Distance (GSD)</i>	62
2.3.5 Pontos de Controle.....	64
2.3.6 Pontos de Verificação	65
2.3.7 Modelo Digital da Superfície e Modelo Digital do Terreno.....	65
2.3.8 Ortofoto.....	67
2.3.9 VANTs / Drones.....	69
2.3.10 Programas para Planejamento e Processamento de Dados	71
2.3.11 Legislação	74
2.4 RECENTES APLICAÇÕES DE VANTS EM ATIVIDADES DE ENGENHARIA.....	75
2.4.1 Comparação de Resultados Planialtimétricos Obtidos em Obras em Andamento.	76
2.4.2 Caso Comparativo entre Topografia e Aerofotogrametria por VANT	89
2.4.3 Avaliação de Resultados de MDS Gerado por Mapeamento Aéreo no Estacionamento da UTFPR-Curitiba Sede Ecoville	93
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	98
3.1 EQUIPAMENTOS E <i>SOFTWARES</i> UTILIZADOS.....	98
3.1.1 VANT DJI Phantom 3 <i>Advanced</i>	98
3.1.2 Estação Total Leica TS06 <i>Plus</i>	100
3.1.3 Programa para Pilotagem Assistida e Planejamento de Voo	101
3.1.4 Programa para Processamento de Dados	102
3.1.5 Computador para Processamento	102
3.2 LOCAL DE ESTUDO.....	103

3.3	AQUISIÇÃO DE DADOS COM A ESTAÇÃO TOTAL.....	104
3.4	PLANEJAMENTO DE VOO	106
3.4.1	Segurança	106
3.4.2	Parâmetros de Voo.....	107
3.5	PROCESSAMENTO DE DADOS.....	110
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	112
4.1	GEORREFERENCIAMENTO DO MODELO	112
4.1.2	Acurácia Absoluta do Modelo Georreferenciado por Pontos de Controle	113
4.1.3	Acurácia Relativa para Modelo Apoiado sobre 3 Pontos de Controle	121
4.2	ANÁLISE GRÁFICA DOS RESULTADOS	123
4.2.1	Modelo Digital de Superfície	123
4.2.2	Modelo Digital do Terreno	123
4.2.4	Ortofoto.....	125
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	127
	REFERÊNCIAS.....	129

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução tecnológica dos equipamentos topográficos e de softwares específicos para a topografia, a metodologia para locação e levantamento de dados em terrenos, sejam rurais ou urbanos, vem mudando proporcionalmente a esses avanços. Na topografia os métodos de levantamento de dados são classificados conforme o equipamento utilizado durante o processo. Teodolitos e fitas métricas, estações totais e prismas, e posteriormente, a utilização de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*), são os equipamentos mais comuns utilizados na obtenção de dados planialtimétricos. Levantamentos realizados com tais equipamentos são poucos viáveis tratando-se de grandes áreas ou de áreas de difícil acesso. Como alternativa, surgiu a aerofotogrametria, que apesar de não ser um recurso barato torna possível e vantajoso a realização do levantamento perante os métodos previamente estabelecidos.

A aerofotogrametria obteve um avanço em sua aplicabilidade após a utilização dos VANTs (Veículos Aéreos Não Tripuláveis) no processo de obtenção de dados. A rápida popularidade dessas minis aeronaves impulsionou o aparecimento de novas áreas de estudo e de aplicação no setor da construção civil e da agricultura (BEARD *et al*, 2005). Devido ao baixo investimento inicial, integração com sistemas de navegação por satélite, flexibilidade de voo, e a diminuição do tamanho e peso de sensores, os VANTs estão sendo utilizados como uma alternativa para obter dados geoespaciais (SIEBERT; TEIZER, 2014).

Os VANTs podem tornar viável a utilização da aerofotogrametria para o mapeamento de áreas urbanas e pequenas áreas rurais, pois são equipamentos ágeis, que adquirem resultados rapidamente e mais detalhados que a topografia convencional, facilitando a tomada de decisão para os profissionais envolvidos. Conseqüentemente, torna-se importante analisar a precisão dos resultados obtidos pelo levantamento aerofotogramétrico realizado por essas aeronaves, especificadamente para as aeronaves de baixo custo, para que se possam estimar os limites de atuação dessa tecnologia para o mapeamento aéreo.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é analisar a acurácia obtida dos resultados de um levantamento aerofotogramétrico realizado por um VANT de baixo custo, confrontando-os com os resultados obtidos por uma estação total e com estudos previamente realizados.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Analisar os resultados de estudos de casos de levantamentos aerofotogramétricos realizados com VANTs;
2. Explicar de forma sucinta os procedimentos utilizados para o levantamento topográfico utilizando a Estação Total;
3. Descrever a configuração do sistema utilizado para a realização da aerofotogrametria;
4. Elaborar um plano de voo detalhado, exemplificando os procedimentos necessários para o levantamento aéreo;
5. Gerar um Modelo Digital de Superfície através do *software* Pix4D;
6. Analisar as diferenças das medidas obtidas entre pontos levantados pela estação total e pelo VANT;
7. Analisar a diferença entre a acurácia relativa do levantamento utilizando diferentes pontos de controle;
8. Através dos resultados e dificuldades encontradas no procedimento, avaliar a configuração adotada para o levantamento e recomendar possíveis modificações, melhoramentos e novas análises para futuros trabalhos.

1.3 JUSTIFICATIVA

Com a regulamentação dos VANTs no mercado internacional e nacional, e o vertiginoso avanço tecnológico dos componentes eletrônicos, é impossível desprezar que esses equipamentos podem impactar diversas áreas de engenharia e o setor da agricultura.

Assim como no setor da tecnologia, as empresas do setor da construção civil acompanham esse crescimento e se reorganizam para otimizar processos e manter a competitividade. A utilização dos VANTs na área da engenharia pode ser uma vantagem competitiva para as empresas que usufruírem dessa tecnologia.

Antes do surgimento de softwares de mapeamento aéreo, obter dados topográficos tridimensionais rapidamente era praticamente impossível devido à tecnologia e recursos disponíveis. Com a utilização dos VANTs para levantamentos topográficos, tornou-se possível a aquisição de dados de forma rápida e precisa. Pela criação do MDT (Modelo Digital do Terreno) é possível obter dados espaciais, volumétricos, distinguir diferentes materiais presentes na superfície e simular possíveis alterações no projeto.

Com equipamentos requintados a precisão do levantamento aerofotogramétrico já traz resultados satisfatórios. Contudo, o custo desses equipamentos pode ser ainda um entrave para a consolidação da tecnologia no setor da construção civil. Portanto, torna-se interessante analisar a viabilidade dessa metodologia com equipamentos mais acessíveis, que de fato apresentarão uma precisão menor, mas que podem ser bastante úteis para determinadas fases de desenvolvimento de um empreendimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 TOPOGRAFIA

Para McCormac (2007, p.1) a topografia é a “ciência que trata da determinação das dimensões e contornos (ou características tridimensionais) da superfície física da Terra, através da medição de distâncias, direções e altitudes”, Isso inclui o cálculo de áreas, volumes e confecção de mapas e cartas topográficas.

Segundo Borges (2013, p.1) “a topografia faz o levantamento plano-altimétrico do terreno, como dado fundamental ao projeto”. Tal ciência pode obter medidas de distâncias horizontais com erro provável de 1/100.000, ou ainda para medidas verticais com precisão de décimo de milímetro (BORGES, 2013). Ao longo dos anos os equipamentos utilizados para medição e marcação de terras foram evoluindo tecnologicamente tornando o processo mais rápido e mais preciso. Acredita-se que com a chegada dos SANTs (Sistemas Aéreos Não Tripuláveis), a topografia ganha um novo equipamento para a obtenção de dados topográficos. Denomina-se “Sistemas”, pois é a interação de vários equipamentos secundários aos VANTs, tais como, receptores GNSS, câmeras digitais, sensores térmicos e sensores infravermelho.

Atualmente, os equipamentos mais comuns utilizados para a realização de levantamentos topográficos são as estações totais e os receptores GNSS, os quais serão discutidos nas seções 2.1.1 e 2.1.2.

2.1.1 Estação Total

Nos últimos anos a topografia baseou-se no levantamento elaborado por diferentes equipamentos de medição de distâncias e de ângulos. Os mais comuns para medição de distâncias, sem dúvida, eram as fitas métricas que podem ser fabricadas com diferentes materiais, tamanhos e escalas. Para a medição de ângulos, dois equipamentos eram mais utilizados, os trânsitos e os teodolitos. Estes

últimos utilizavam a leitura ótica e eram mais precisos que os primeiros (MCCORMAC, 2007).

Após o aparecimento das estações totais automáticas, a topografia obteve um novo avanço na precisão e na velocidade do levantamento. Esses equipamentos medem distâncias inclinadas e calculam suas componentes, horizontais e verticais, medem ângulos verticais e horizontais, e determinam as coordenadas dos pontos observados. A informação da coordenada obtida pode ser armazenada em um computador, na própria estação total ou em um coletor de dados automático. (MCCORMAC, 2007).

Para a medição de distâncias, alguns desses equipamentos utilizam a tecnologia do raio infravermelho. Através da onda emitida em direção a um prisma topográfico, a estação total consegue medir distâncias de até aproximadamente 300 a 800 metros, sendo algumas com a capacidade de medir distâncias até 2000 metros. Os equipamentos mais caros podem chegar a uma precisão de $\pm (1\text{mm} + 1\text{ppm})$ (MCCORMAC, 2007). Na Figura 1 está ilustrado um dos mais de 100 modelos de estação total no mercado em 2003.



**Figura 1 – Estação Total Série Top Gun DTM 400
Fonte: McCormac (2007, p.156).**

O método de levantamento topográfico mais comum para a medição de áreas é o método polar, ou ainda método da irradiação, o qual consiste em

determinar as posições e as cotas dos pontos desejados através das medidas dos ângulos e distâncias obtidas pela estação total (SILVA *et al.*, 2006). O equipamento deve ser posicionado em uma local de coordenadas conhecidas, e que permita visualização de todos os pontos do terreno, como ilustrado na Figura 2.

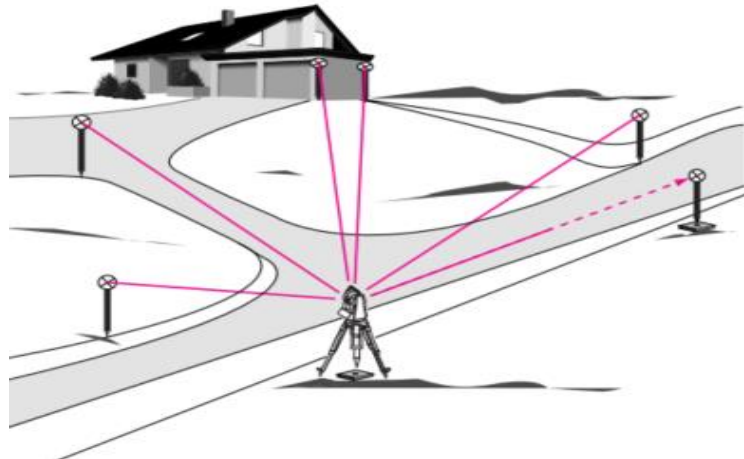


Figura 2 – Levantamento (Método Polar)
Fonte: Zeiske (2016).

Após o equipamento ser instalado, é necessário que o prisma ótico seja posicionado em um segundo ponto conhecido. Então, com a estação total nivelada, deve-se visar esse segundo ponto para sua orientação. Em seguida, com a estação total mirando o ponto em que o prisma foi posicionado, zera-se o ângulo horizontal para referenciar os demais. Desta forma, cada ponto subsequente estará posicionado conforme os ângulos e as distâncias encontrados referentes à posição do equipamento e do ponto inicial (ZEISKE, 2016).

A Figura 3 exemplifica como são calculadas as coordenadas dos pontos desejados.

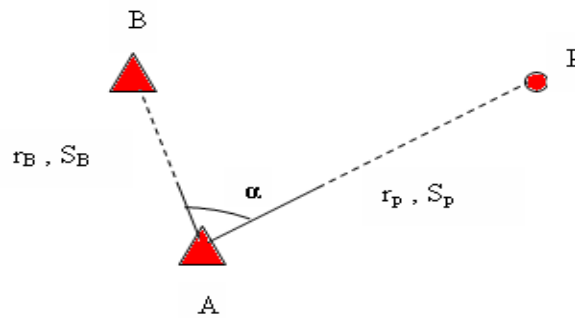


Figura 3 – Exemplo do Método Polar
Fonte: Kahmen e Faig (1988) apud Silva et al. (2006).

As coordenadas cartesianas do ponto “P” são calculadas conforme as equações (1) e (2):

$$X_p = S_p \sin(AZ_{AB} - rB + rp) \quad \text{Eq. (1)}$$

$$Y_p = S_p \cos(AZ_{AB} - rB + rp) \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

$$\alpha = (rp - rB)$$

α = diferença entre as direções rp , rB ;

AZ_{AB} = azimute de AB;

rp , rB = direções medidas;

S_p = distância medida.

Segundo Silva *et al.* (2006, p. 6) para trabalhos que exigem uma maior precisão, deve-se utilizar as equações (3) e (4) para a determinação das coordenadas cartesianas de “P”.

$$q = S_{AB}/S_B \quad \text{Eq. (3)}$$

$$S_{AB} = [(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2]^{0,5} \quad \text{Eq. (4)}$$

$$X_p = q \cdot S_p \cdot \sin(rp + \alpha) \quad \text{Eq. (5)}$$

$$Y_p = q \cdot S_p \cdot \cos(rp + \alpha) \quad \text{Eq. (6)}$$

O coeficiente “q” representa um fator de escala entre a distância calculada S_{AB} e a distância S_B .

Silva *et al.* (2006) esclarece que esse método é um método não-homogêneo no sentido da distribuição do erro, pois a precisão de um ponto é relacionada à precisão de outro ponto vizinho a esse, ou seja sua precisão é relativa ao ponto que lhe antecede.

As estações totais são classificadas conforme os desvios-padrão que as caracterizam de acordo com o Quadro 1.

Classes de Estações Totais	Desvio-padrão Precisão Angular	Desvio-padrão Precisão Linear
1-Precisão baixa	$\leq \pm 30''$	$\pm(5\text{mm} + 10\text{ppm} \times D)$
2-Precisão média	$\leq \pm 07''$	$\pm(5\text{mm} + 5\text{ppm} \times D)$
3-Precisão alta	$\leq \pm 02''$	$\pm(3\text{mm} + 3\text{ppm} \times D)$

Quadro 1 – Classificação de Estações Totais

Fonte: NBR 13133 (1994) apud Jeronymo; Pereira (2015).

2.1.2 Sistema GNSS

Mundialmente conhecido como Sistema GPS (*Global Positioning System*) é o sistema de navegação de satélites que oferece posicionamento autônomo geoespacial com cobertura global. O termo genérico adequado para a representação do sistema a ser utilizado é GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que em português significa Sistema Global de Navegação por Satélite. O termo GPS é utilizado para o sistema dos EUA que é denominado NAVSTAR (*Navigation Satellite with Time and Ranging*) (BARTEL, 2013). Existem outros sistemas criados por outros países como o GLONASS elaborado pelos russos; o Galileo que é o sistema em desenvolvimento pela união europeia; Beidou é o sistema Chinês de navegação; IRNSS sistema também em desenvolvimento pela Índia; QZSS sistema regional de navegação dos japoneses. Apesar de existirem vários sistemas de posicionamento global, os únicos em operação até o ano de 2013 eram os sistemas dos americanos e dos russos (BARTEL, 2013). O sistema GPS foi desenvolvido em 1978 pelo DOD

(Departamento de Defesa Americano) quando a entidade começou a lançar seus satélites no espaço.

2.1.2.1 Sistema GPS

Segundo McCormac (2007), o sistema GPS, a princípio, foi desenvolvido para fins militares, para posicionamento geodésico de navios, aeronaves e unidades militares. Contudo, nos últimos anos, ele oferece um grande benefício para a comunidade civil. O sistema de posicionamento pode ser utilizado para realizar qualquer tarefa que possa ser feita com as técnicas de levantamento convencionais, e é de livre acesso para os usuários, em qualquer lugar e em qualquer hora do dia. Algumas das atividades mais comuns de usos de receptores GNSS são:

- Rastrear o percurso de caminhões, locomotivas, carros de aluguel e táxis.
- Navegação para navios e aeronaves.
- Aparato policial e veículos de emergência.
- Cartas eletrônicas de navegação terrestre e marítima.
- Georreferenciamento de grandes propriedades rurais.

O sistema GPS é um sistema projetado para fornecer o posicionamento instantâneo, ou as informações de deslocamento de um objeto situado na superfície da Terra ou em sua proximidade, por meio da análise do tempo de viagem de uma onda de rádio entre os satélites e um receptor (JAUCH; SILVA; PAZ, 2014). Essa onda chega ao receptor portando um código que o satélite gerou alguns segundos atrás. Portanto, com a diferença de tempo entre a emissão e a leitura do código é possível determinar o tempo de viagem da onda. Para isso, os satélites utilizam relógios de alta precisão, relógios atômicos, que são os mais precisos já desenvolvidos (CARVALHO; ARAÚJO, 2009). Os sinais emitidos pelos satélites são transmitidos através de ondas (portadoras) sendo denominadas L1 e L2. A onda L1 tem frequência 1575.42 MHz e 19 centímetros de comprimento de onda. A L2 tem frequência de 1227.60 MHz e 24 centímetros de comprimento de onda (NUNES; NAKAI; BARROS, 2013). Sobre as frequências são modulados a mensagem de

navegação e os códigos pseudoaleatórios PRN (*Pseudo Random Noise*) sendo eles: P (*Precise ou Proteged*) que é modulado sobre as duas portadoras (L1 e L2), e o C/A (*Course/Acquisition*) modulado somente sobre a portadora L1 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2008).

Com o cálculo do tempo e da velocidade de propagação do sinal codificado que cada satélite emite, é possível determinar a distância entre o receptor e os pontos de referência, que são os satélites. Como o posicionamento dos satélites é conhecido com exatidão, é possível realizar a triangulação entre eles e o receptor (NUNES; NAKAI; BARROS, 2013). Com a interseção de três satélites, pode-se calcular uma posição em duas dimensões (latitude e longitude), quando o cálculo é realizado com a interseção de 4 satélites é possível obter posições em três dimensões (latitude, longitude e altitude). O erro que possa ocorrer em um dos cálculos é diluído no conjunto das quatro medições, garantindo assim uma maior precisão (CARVALHO; ARAÚJO, 2009). Na Figura 4 está ilustrada a triangulação entre os satélites e o receptor GPS com suas respectivas distâncias.

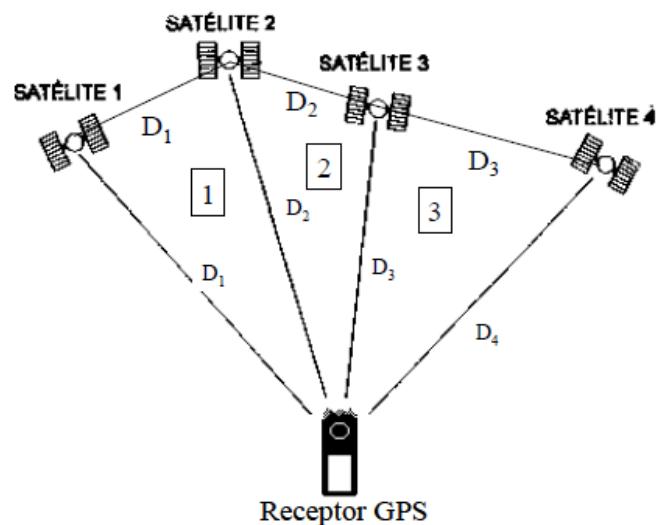


Figura 4 – Triangulação Entre Receptor GPS e Satélites
Fonte: Nunes; Nakai e Barros (2013).

Existem 32 satélites do sistema GPS distribuídos em 6 diferentes planos orbitais que estão localizados entre 2.000 e 22.000 km de altitude na órbita terrestre. Outros 4 satélites estão desativados mas podem entrar em funcionamento quando necessário (JAUCH; SILVA; PAZ, 2014). Suas órbitas têm duração de 11 horas e 58 minutos, esse período possibilita passarem por um mesmo ponto pelo menos duas vezes por dia. Os satélites são programados para terem inclinação de 55° em

relação ao equador, garantindo desta forma que, no mínimo, 4 satélites possam ser rastreados por receptores GPS em qualquer hora e local do planeta (CARVALHO; ARAÚJO, 2009; JAUCH; SILVA; PAZ, 2014). A Figura 5 ilustra os principais programas espaciais em órbita, juntamente com a escala de distância, velocidade orbital e o período orbital.

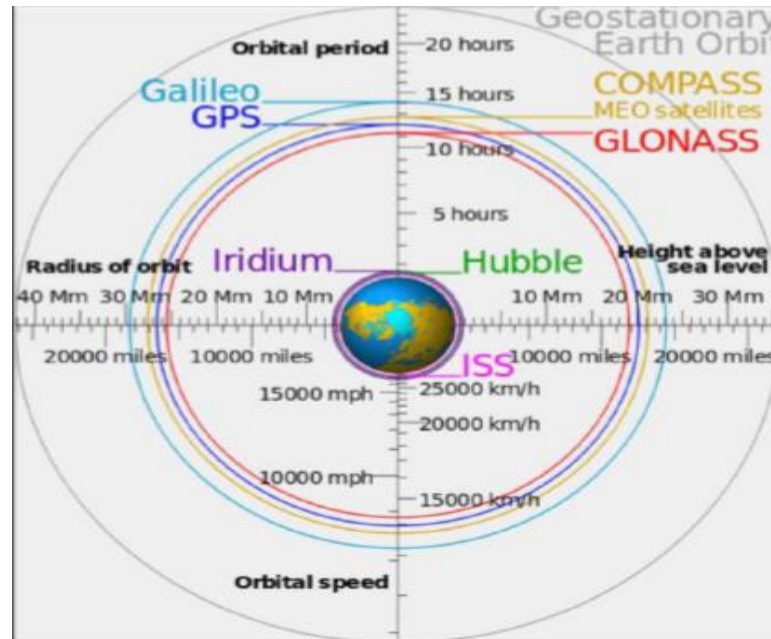


Figura 5 – Planos Orbitais e Suas Características

Fonte: Rodrigues e Schimaleski (2012) apud Jauch; Silva e Paz (2014).

2.1.2.2 Receptores GPS

Os receptores GPS são os dispositivos que coletam os dados enviados pelos satélites e os transformam em informações como: distâncias, coordenadas, tempo, deslocamento e velocidade (CARVALHO; ARAÚJO, 2009). Podem ser classificados em três diferentes categorias: Quanto ao uso, à aplicação e quanto às especificações técnicas (NUNES; NAKAI; BARROS, 2013). Para a classificação segundo a utilização destacam-se três categorias:

- Navegação: destinado à navegação terrestre, marítima e aérea, bem como a levantamentos com precisão de ordem métrica. Na maioria dos casos, as observações utilizadas são as pseudodistâncias derivadas do código C/A (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2008);
- Topográfico: podem proporcionar posicionamento preciso quando utilizados em conjunto com um ou mais receptores localizados em estações de referência, mas sua utilização fica restrita a uma área compreendida dentro de um círculo de raio de aproximadamente 10 quilômetros. Estes receptores

são capazes de rastrear a fase da onda portadora L1 e o código C/A (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2008);

- Geodésico: receptores capazes de rastrear a fase da onda portadora nas duas frequências. Isso possibilita sua utilização em linhas de base maiores que 10 km, pois é possível modelar a maior parte da refração ionosférica a partir do uso da combinação linear livre da ionosfera (*ion free*) durante o processamento dos dados. Normalmente estes receptores são utilizados na geodésia (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2008).

Segundo Nunes, Nakai e Barros (2013, p.18), para o uso civil, podem ser diferenciados de acordo com a precisão alcançada pelos aparelhos:

- Aparelhos de baixa precisão: identificam apenas o código C/A (*Coarsel/ Aquisition Code*) com frequência de 1.023MHz. Apresentam erro de até 30 metros, sem a possibilidade de transferir os dados para o computador (sem correção diferencial).
- Aparelhos de média precisão: possuem a mesma característica dos aparelhos de baixa precisão, porém utilizam a portadora L1 com o código C/A e possibilitam a transferência dos dados armazenados para o computador para o pós-processamento no método diferencial. Apresentam erro de alguns metros.
- Aparelhos de alta precisão: denominados de sub-métricos, apresentam antena externa pré-amplificada, possibilitam a transferência dos dados para o computador e, portanto, podem trabalhar no método diferencial. Utilizam a portadora L1 (códigos C/A) e apresentam erro de 1 a 10 metros, sendo possível diminuir o erro para centímetros após processamento. Na Figura 6 está ilustrado um modelo desse equipamento.
- Aparelhos de altíssima precisão: são aparelhos com antena externa pré-amplificada que identificam as portadoras L1 e L2, possibilitam trabalhar no método diferencial e apresentam erros de milímetros.



Figura 6 – Receptor GPS de Alta precisão
Fonte: Bartel (2010).

2.1.2.3 Técnicas de posicionamento

As técnicas de posicionamento podem ser classificadas como estáticas e cinemáticas, dependendo do movimento da antena, bem como o tipo de processamento, se ocorre em tempo real ou pós-processado. Podem também, ser classificadas quanto à metodologia adotada, utilizando ou não uma estação base de referência, sendo denominadas de posicionamento relativo e posicionamento por ponto, respectivamente (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2008).

As técnicas mais indicadas para levantamentos topográficos são as que apresentam melhor precisão e agilidade na obtenção dos dados, ou seja, são as técnicas de posicionamento relativos ou diferenciais. Na Tabela 1 estão comparadas as técnicas de posicionamento segundo a observação e a precisão, enquanto que na Tabela 2 está apresentada a precisão do posicionamento relativo em função do tempo de observação, do equipamento utilizado e do comprimento da linha base.

Tabela 1 – Precisão das Técnicas de Posicionamento

Técnica		Observação	Precisão (nível de confiança de 68,2 %)
Por ponto	Convencional	Pseudodistância	15,3 m
	Preciso	Pseudodistância e fase	0,02 m
Relativo	Estático	DD pseudodistância e fase	0,01 a 1 ppm
	Estático-rápido	DD pseudodistância e fase	1 a 10 ppm
	Semicinemático	DD pseudodistância e fase	1 a 10 ppm
	Cinemático	DD pseudodistância e fase	1 a 10 ppm

Fonte: Adaptado de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2008).

Tabela 2 – Precisão da Técnica de Posicionamento Relativo

Linha de Base	Tempo de observação	Equipamento Utilizado	Precisão
00 – 05 Km	05 – 10 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
05 – 10 Km	10 – 15 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
10 – 20 Km	10 – 30 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
20 – 50 Km	02 – 03 hr	L1/L2	5 mm + 1 ppm
50 – 100 Km	mínimo. 03 hr	L1/L2	5 mm + 1 ppm
> 100 Km	mínimo. 04 hr	L1/L2	5 mm + 1 ppm

Fonte: Adaptado de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2008).

2.1.2.4 Levantamentos com GPS

Para Seeber (2003) O levantamento topográfico com GPS tornou-se uma ferramenta universal devido à tecnologia RTK (*Real Time Kinematic*). Seeber (2003) ainda afirma que a tecnologia RTK é uma segunda denominação para o método diferencial, sendo sua principal característica a capacidade de se obter centímetros de precisão momentaneamente, utilizando equipamentos de fácil manuseio e de alta integração. O conceito de funcionamento do método diferencial fundamenta-se na integração dos dados enviados por um grupo de satélites recebidos por dois diferentes receptores GPS. Pelo menos dois satélites devem ser comuns aos dois receptores, desta forma, com um dos receptores posicionado em um ponto de coordenadas conhecidas (denominado de Estação Base) o outro receptor (denominado *Rover*) pode realizar a “varredura” no local, o qual recebe a correção dos dados pela Estação Base. Na Figura 7 está ilustrado o conceito do método diferencial onde está realçada a necessidade de pelo menos dois satélites serem comuns aos receptores. Na Figura 8 está ilustrado o procedimento de levantamento

topográfico com GPS, no qual são ilustrados os pontos em que o *Rover* irá coletar as coordenadas através do sinal de rádio recebido pela Estação Base.

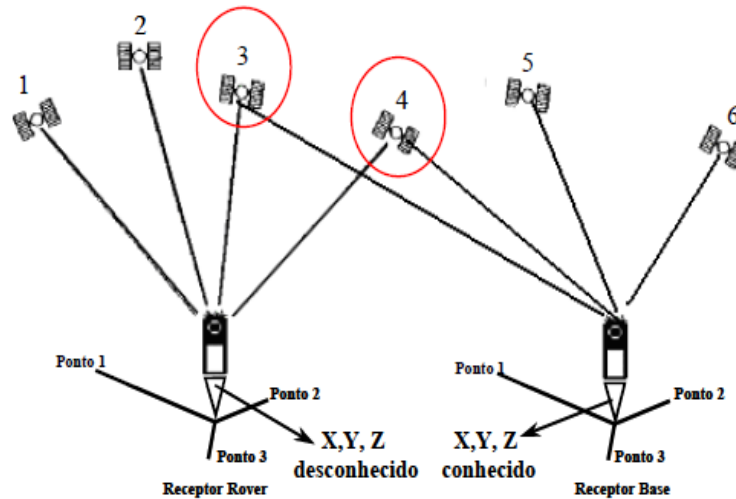


Figura 7 – Método Diferencial (RTK)
Fonte: Nunes; Nakai; Barros (2013).

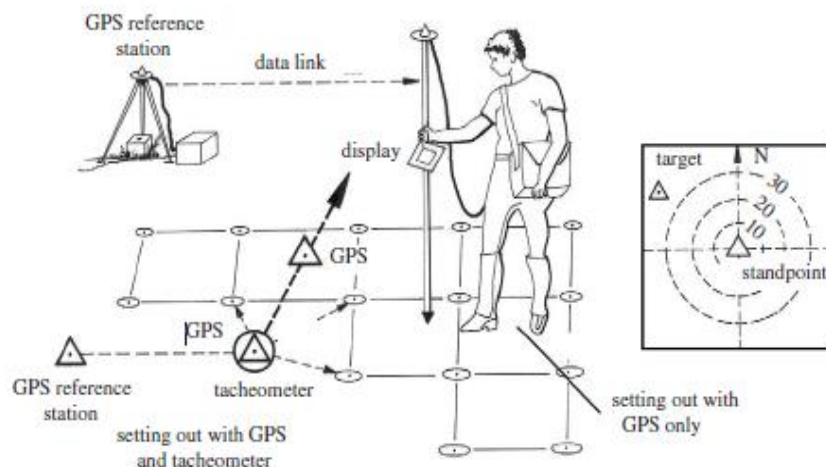


Figura 8 – Procedimento de Campo pelo Método RTK
Fonte: Seeber (2003; p.369).

O aparecimento da tecnologia de posicionamento geoespacial por satélites, assim como, a utilização computacional para o tratamento de dados geoespaciais e o surgimento da tecnologia de captação de imagem digital, possibilitaram o aparecimento de novas disciplinas que tratam das características físicas e sociais da vida na Terra, as quais serão discutidas no tópico 2.2.

2.1.3 Recomendações para Levantamentos Georreferenciados

Os termos precisão, exatidão e acurácia são amplamente discutidos em atividades que envolvem a aferição de medidas. São frequentemente utilizados em levantamentos geodésicos, topográficos, análises de equipamentos, levantamentos fotogramétricos, e definem a viabilidade de uma metodologia na utilização em um levantamento. Conseqüentemente, a definição do significado dos termos precisão, exatidão e acurácia são fundamentais para o entendimento do presente trabalho.

2.1.3.1 Precisão

“A Precisão é o nível de aderência entre os valores observados, sua repetibilidade ou grau de dispersão” (INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA, 2003, p.6). “Precisão é a proximidade entre valores obtidos pela repetição do processo de mensuração” (SISTEMA GALILEU DE EDUCAÇÃO ESTATÍSTICA, 2016). Desta forma, boa precisão significa erro estatístico pequeno, porém mesmo com boa precisão a exatidão ou acurácia pode ser ruim caso exista grande erro sistemático (INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA, 2016).

2.1.3.2 Acurácia

“Acurácia é o grau de aproximação de uma grandeza de seu valor verdadeiro, estando, portanto associada a erros sistemáticos (determinísticos) e aleatórios (estocásticos)” (INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA, 2003, p.6). “Acurácia é a proximidade da medida relativamente ao verdadeiro valor da variável” (SISTEMA GALILEU DE EDUCAÇÃO ESTATÍSTICA, 2016).

2.1.3.3 Exatidão

“Exatidão é a correção, perfeição ou ausência de erro em uma medida ou cálculo” (SISTEMA GALILEU DE EDUCAÇÃO ESTATÍSTICA, 2016). Porém para o ITA (Instituto Tecnológico de Aeronáutica) a Exatidão e a Acurácia são sinônimas, e portanto, recebem a mesma definição: “exatidão ou acurácia é o grau de concordância entre o resultado de uma medição e o valor verdadeiro do mensurado” (INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA, 2016). Na Figura 9 estão exemplificados, comparativamente, os conceitos de Acurácia e Precisão.

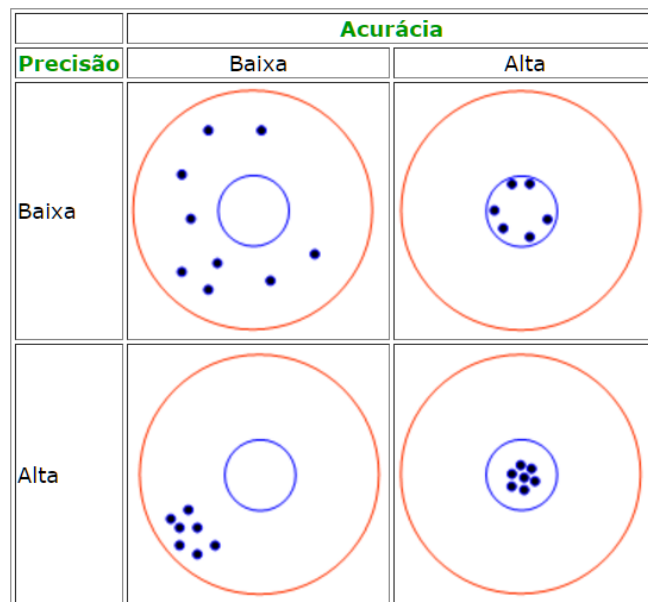


Figura 9 – Comparação entre Acurácia e Precisão
 Fonte: Sistema Galileu de Educação Estatística (2016).

2.1.3.4 Classificação do levantamento georreferenciado

A Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais, publicada pelo INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária) de novembro de 2003, classifica levantamentos georreferenciados em:

- Levantamentos de controle: “fornecem arcabouço de pontos diversos com coordenadas e altitudes, destinadas à utilização em outros levantamentos de ordem inferior. São obrigatoriamente submetidos às

reduções geodésicas e tem seus níveis de precisão definidos pela Tabela 3”.

- Levantamentos cadastrais: “destinados ao levantamento dos limites definidores das propriedades rurais, de sua superfície topográfica, de seus acidentes naturais, artificiais e culturais”.

A Norma supracitada define que os padrões de precisão e acurácia são independentes das técnicas utilizadas no levantamento, uma vez que estes podem ser alcançados de formas distintas.

Para classificação quanto à precisão na Tabela 3 estão apresentados os valores limites de classes (P1 – P3) de acordo com níveis de precisão.

Tabela 3 – Classes de Acordo com a Precisão Planimétrica (“P”) Após Ajustamento

1 Classe	2 Precisão 68,7% (1σ)	3 Finalidade
P1	+/- 100mm	Controle A (apoio básico), Georreferenciamento
P2	+/- 200mm	Controle B (apoio imediato), Georreferenciamento
P3	+/- 500mm	Cadastrais, Georreferenciamento

Fonte: Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (2003, p.6).

A Norma ainda define que no caso de georreferenciamento de imóveis rurais, é possível avaliar a acurácia de observações em todas as coordenadas de vértices já verificados pelo INCRA. Na Tabela 4 está apresentado o valor limite do nível de acurácia após ajustamento.

Tabela 4 – Nível de Acurácia Após Ajustamento

1 Classe	2 Acurácia 68,7% (1σ)	3 Finalidade
P3	+/- 500mm	Cadastrais, Georreferenciamento

Fonte: Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (2003, p.6).

2.1.3.4.1 Poligonais geodésicas de precisão (controle básico)

Para controle do transporte de pontos de controle planimétrico a partir de dados fundamentais do Sistema Geodésico Brasileiro, a Norma define os valores limites conforme a Tabela 5. Esses dados devem ser exclusivamente oriundos de:

- a) “redes geodésicas estaduais estabelecidas a partir do rastreamento de sinais de satélites de posicionamento e homologadas pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística)”;
- b) “vértices da rede fundamental (1ª ordem) brasileira, desde que os mesmos tenham sido reocupados com rastreadores de sinais do GPS, e suas novas coordenadas homologadas pelo IBGE”;
- c) “Deverão necessariamente partir e chegar em pontos distintos das redes mencionadas acima, com precisão definida na classe P1 (Tabela 3)”.

Tabela 5 – Poligonais Geodésicas de Precisão (Controle Básico)

Descrição	valores
1 Espaçamento entre estações	
1 Geral	10 - 20 km
1.3 Extensão máxima da poligonal	80 km
2 Medição Angular Horizontal	
2 Método	das direções
3 Instrumento (classificação ABNT)	precisão alta
4 Número de Séries	3
5 Número de posições p/ série	4 CE e 4 CD
6 Limite de rejeição	5,0"
Número mínimo de posição, após rejeição	6 ou 10 CE e CD
3 Medição dos lados	
7 Número mínimo de séries de leituras recíprocas	3
8 Intervalo mínimo entre séries	20 minutos
9 Diferença máxima entre séries	10 mm + 1 ppm
10 Diferença máxima entre leituras recíprocas de uma mesma série	20 mm + 1 ppm
4 Controle de refração atmosférica	
11 Leitura estimada da temperatura	0,2° C
12 Leitura estimada da pressão atmosférica	0,2 mm Hg
13 Leituras recíprocas e simultâneas dos ângulos verticais com medição de lados	Sim
5 Controle Azim utsal	
14 Espaçamento entre os lados de controle	8 – 10
15 Pontos de Laplace	
– Número de séries	1
– Número de posições por série	8 ou 12 em CE e CD
– Valor máximo do erro padrão do azimute para a direção de controle	0,6"
16 Erro de fechamento máximo em azimute para direções de controle	3"/estação
6 Medição angular vertical	
17 Número de posições recíprocas e simultâneas	4 CE e 4 CD
18 Valor máximo da diferença em relação à média	10"
19 Número de lados entre pontos de altitudes conhecidas	8 – 10
20 Valor máximo do erro de fechamento	1 m/estação
7 Fechamento em coordenadas	
21 Erro padrão em coordenadas após a compensação em azimute. (L = comprimento em km)	$0,2 \text{ m } \sqrt{L}$
8 Erro padrão relativo máximo aceitável entre duas estações de referência após ajustamento	1/20.000

Fonte: Instituto Nacional De Colonização E Reforma Agrária (2003, p.15).

2.1.3.4.2 Poligonais geodésicas de apoio à demarcação (Controle imediato)

Finalidade: Proporcionar a densificação de pontos de controle para levantamentos de imóveis rurais, fornecendo coordenadas a partir das quais serão feitas operações topográficas de demarcação e/ou levantamento, a serem desenvolvidas na região dos serviços.

Deverão partir e chegar em pontos distintos da Poligonal Geodésica de Precisão, com precisão definida na classe P2 (Tabela 3).

Tabela 6 – Poligonais Geodésicas de apoio à Demarcação (Controle Imediato)

Descrição	valores
1 Espaçamento entre estações	
1.1 Geral	5 – 10 km
1.2 Extensão máxima da poligonal	50 km
2 Medição Angular Horizontal	
2.1 Método	das direções
2.2 Instrumento (classificação ABNT)	precisão alta
2.3 Número de Séries	1
2.4 Número de posições p/ série	4 CE e 4 CD
2.5 Limite de rejeição	5,0"
2.6 Número mínimo de posição após rejeição	3 CE e 3 CD
3 Medição dos lados	
3.1 Número mínimo de séries de leituras recíprocas	1
3.2 Intervalo mínimo entre recíprocas	20 minutos
3.3 Diferença máxima entre as séries	10 mm
3.4 Diferença máxima entre leituras recíprocas de uma mesma série	20mm
4 Controle de refração atmosférica	
4.1 Leitura estimada da temperatura	0,2° C
4.2 Leitura estimada da pressão atmosférica	0,2 mm Hg
4.3 Leituras recíprocas e simultâneas dos ângulos verticais com medição de lados	Sim
5 Controle Azimutal	
5.1 Espaçamento entre os lados de controle	12 – 15
5.2 Pontos de Laplace	
– Número de séries	1
– Número de posições por série	4CE e 4 CD
– Valor máximo do erro padrão do azimute para a direção de controle	3,0"
5.3 Erro de fechamento máximo em azimute para direções de controle	8"/estação
6 Medição angular vertical	
6.1 Número de posições recíprocas e simultâneas	2 CE e 2 CD
6.2 Valor máximo da diferença em relação à média	10"
6.3 Número de lados entre pontos de altitudes conhecidas	15 – 20
6.4 Valor máximo do erro de fechamento	10 mm/km
7 Fechamento em coordenadas	
7.1 Valor máximo para o erro padrão em coordenadas após a compensação em azimute. (L = comp, em km)	0,8 m \sqrt{L}
8 Valor máximo do erro padrão relativo, aceitável entre duas estações de referências após ajustamento	1/5.000

Fonte: Instituto Nacional De Colonização E Reforma Agrária (2003, p.16).

2.2 GEOMÁTICA

“A Geomática é a área tecnológica que visa à aquisição, ao armazenamento, a análise, a disseminação e o gerenciamento de dados espaciais” (MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, 2000, p.9), foi reinventada no Canadá em meados de 1980 pelo

fotogrametrista Michel Paradis, e visa transmitir uma visão moderna sobre as disciplinas que abordam a aquisição, processamento e a disseminação de dados espaciais, tais como: a topografia, fotogrametria, geodésia, cartografia, sensoriamento remoto e o SIG (Sistema de Informação Geográfica) (KEMP, 2007). De outra forma, a Geomática é a ciência que lida com a sistematização do fluxo de informações relacionadas à Terra, de forma a organizá-las eficientemente. Essa sistematização parte desde a aquisição de medidas iniciais usando diferentes tecnologias, ao processamento e disseminação de dados em diferentes formatos, como por exemplo: mapas, tabelas de informações geoespaciais, coordenadas, análises estatísticas, imagens aéreas e etc (KEMP, 2007).

A ferramenta Google Earth, é um exemplo da gestão eficiente do fluxo de informações espaciais da Terra, pois é baseada na aquisição, integração, processamento e disseminação de imagens de satélites, fotogrametria aérea, MDTs (Modelos Digitais de Terrenos), mapas rodoviários e posicionamento de GPS obtido de diversos dispositivos. A Geomática, portanto, preocupa-se com as medidas e representações da Terra, sejam fenômenos naturais ou características de ações humanas, utilizando o conhecimento necessário para dominar a complexidade dos vários métodos de referência espacial (quantitativa e qualitativamente), sendo usada como base de integração para vários sistemas e projetos (KEMP, 2007).

2.2.1 Geodésia

A Geodésia “é a ciência que se ocupa da determinação da forma, das dimensões e do campo de gravidade da Terra” (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2016). “Levantamentos geodésicos são aqueles que consideram a curvatura da superfície física da Terra” (MCCORMAC, 2007, p.5). Tais levantamentos são geralmente realizados por instituições oficiais do governo. No Brasil o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e o DSG (Diretoria de Serviço Geográfico do Exército) são os principais órgãos que se encarregam de tal atividade. O IBGE é responsável pela implantação e manutenção do SGB (Sistema Geodésico Brasileiro) que é “formado pelo conjunto de estações, materializadas no terreno, cuja posição serve como referência a diversos projetos de engenharia –

construção de estradas, pontes, barragens, geofísica, pesquisa científicas entre outros” (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2016).

As atividades geodésicas foram revolucionadas pelo advento do GPS (Sistema de Posicionamento Global), pois esse sistema possibilitou a determinação de posições, estáticas e cinemáticas com maior precisão e rapidez, gerando a necessidade de revisão das características do SGB (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2016).

2.2.2 Geoprocessamento

“Geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica” (CÂMARA; MEDEIROS, 1998, p.1); disponibiliza recursos e dados para que analistas determinem a evolução temporal e espacial de fenômenos geográficos e suas inter-relações em regiões georreferenciadas (CÂMARA; MEDERIOS, 1998, p.9; ECOMAPA, 2016).

“Georreferenciar uma imagem, mapa ou qualquer informação geográfica, é conseguir transformar suas coordenadas conhecidas em um determinado sistema de referência” (PORTAL EDUCAÇÃO, 2013). Para o Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (2009) “Georreferenciar um imóvel é definir a sua forma, dimensão e localização, através de métodos de levantamento topográfico” que determinem as coordenadas, georreferenciadas ao Sistema Geodésico Brasileiro, dos vértices definidores dos limites dos imóveis, e que atinja a precisão posicional de cada ponto aferido em 50 centímetros.

Portanto, o geoprocessamento é o processamento de dados georreferenciados, com o auxílio de ferramentas computacionais denominadas SIG, que permitem fazer análises complexas e integrar dados de diversas fontes, criando um banco de dados (CÂMARA; MEDEIROS, 1998; PORTAL EDUCAÇÃO, 2013). De outra forma, “O Geoprocessamento é um conjunto de tecnologias de coleta, tratamento, manipulação e apresentação de informações espaciais voltado para um objetivo específico” (RODRIGUES, 1993 apud FUNDAMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO, 2016).

O Geoprocessamento só teve início após a utilização dos microcomputadores para o processamento de dados espaciais. Antes dessa ciência ser estabelecida, não existia uma integração entre diferentes levantamentos na malha cartográfica (FUNDAMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO, 2016), assim sendo, o geoprocessamento apresenta um grande potencial em diversas áreas, tais como: na cartografia, na análise de recursos naturais, no planejamento urbano e regional, principalmente se baseado em tecnologias de baixo custo (CÂMARA; MEDEIROS, 1998; PORTAL EDUCAÇÃO, 2013).

2.2.3 Sistema de Informação Geográfica

A sigla SIG (Sistema de Informação Geográfica) refere-se a sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos que possibilitam a análise, armazenamento e manipulação de dados georreferenciados que possam ser visualizados sobre a projeção de um mapa. (CÂMARA; MEDEIROS, 1998; *GIS GEOGRAPHY*, 2016). Além dos dados geométricos e espaciais, os SIGs possuem atributos alfanuméricos que são associados com elementos gráficos fornecendo informações descritivas sobre uma região. São geralmente armazenados em bases separadas para que permitam exames de rotina em ambas as bases simultaneamente (FUNDAMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO, 2016). Para exemplificar o conceito, Na Figura 10 está ilustrada a representação de atributos alfanuméricos coletados em cinco cidades dos Estados Unidos sobre um elemento gráfico, um mapa do país. É difícil localizar as cidades apenas com os dados descritos em uma tabela, quando esses dados são expressos em um mapa, a sua compreensão é facilitada e a tomada de decisão pode ser mais ágil (*GIS GEOGRAPHY*, 2016).

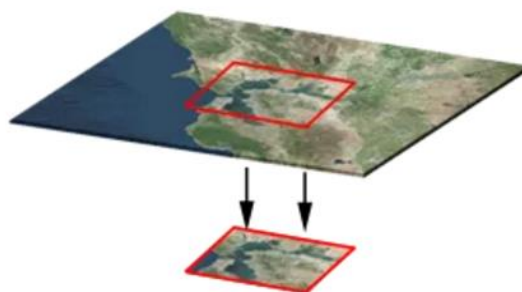


a) Quadro de Atributos

b) Elemento Gráfico

Figura 10 – Representação de dados em um SIG
Fonte: Adaptado de GIS Geography (2016).

McCormac (2007) exemplifica o SIG através da comparação das informações obtidas de um levantamento realizado em uma região residencial no estado da Carolina do Sul. O levantamento comparou fatores como número de habitações unifamiliares, número de habitações coletivas e número de residências móveis. Como resultado foi possível obter as porcentagens de todos os tipos de moradias em relação ao total de moradias na região. Esses levantamentos, quando relacionados a mapas regionais em softwares específicos podem auxiliar na obtenção de qualquer informação de interesse de forma rápida, facilitando a tomada de decisão. Outro exemplo de aplicação de um Sistema de Informação Geográfica é a quantificação de uma área florestal ao redor de uma cidade, como ilustrado na Figura 11. Ou ainda, a determinação da quantidade de espécies afetadas em 1,6 quilômetros de raio em relação ao local de exploração de uma mina (Figura 12). Para ambos os casos a utilização de SIGs pode trazer respostas satisfatórias através de algumas ferramentas de análise (GIS GEOGRAPHY, 2016).



Ferramenta de clipe

Figura 11 – Cobertura de Área por Ferramenta de Clipe
Fonte: GIS Geography (2016).

Com a ferramenta de clipe é possível classificar a quantidade de floresta ao redor de uma cidade pela soma das áreas da malha de pixel que identificam uma floresta.

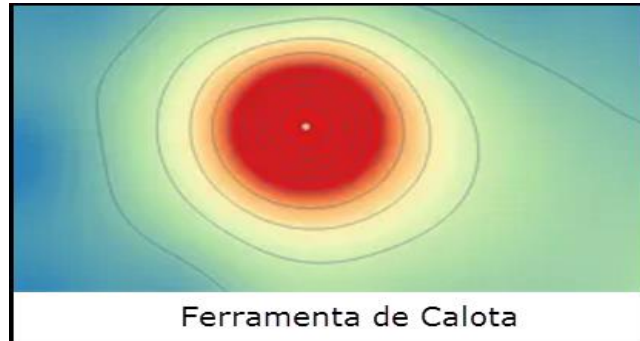


Figura 12 – Área de atingimento por Ferramenta de Calota
Fonte: GIS *Geography* (2016).

Com a utilização da ferramenta de calota é possível saber a quantidade de espécies que serão atingidas pela exploração de uma mina. Ainda é possível identificar a intensidade do atingimento pela variação gradual da coloração da calota ao redor da área explorada.

No SIG a informação sobre o mundo real é coletada e organizada em (*thematic layers*) camadas topológicas ou temáticas, como descrito em GIS *Geography* (2016). De forma mais sistemática, os SIGs trabalham com duas entradas de dados distintas: dados espaciais e dados alfanuméricos, que serão discutidos nos tópicos 2.2.3.1 e 2.2.3.2.

2.2.3.1 Dados espaciais

Os dados espaciais são representados em duas maneiras diferentes: os Dados Vetoriais e os Dados Matriciais ou *Rasters* (FUNDAMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO, 2016).

2.2.3.1.1 Dados vetoriais

São representações de pontos, linhas e polígonos que são utilizados para representar as localizações de objetos como: hidrantes, contornos de rodovias, ferrovias, divisas entre municípios, cidades entre outros. Na Figura 13 está ilustrada a representação de vetores de uma camada em um SIG (FUNDAMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO, 2016; GIS GEOGRAPHY, 2016).



Vectors

Figura 13 – Representação de Vetores em um SIG
Fonte: Adaptado de GIS Geography (2016).

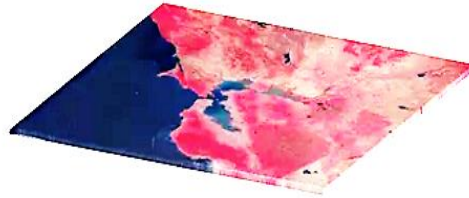
2.2.3.1.2 Dados matriciais

Nesse formato os dados são organizados em matrizes de células, às quais estão associados valores que permitem o reconhecimento de objetos sob a forma de imagem digital. Cada célula corresponde a um pixel que assume uma posição conforme suas coordenadas (linha, coluna). Cada pixel é associado a um valor (inteiro) que varia de 0 a 255, o qual determina a cor do pixel para apresentação na tela ou impressão. Esses valores representam a medição de alguma grandeza física que corresponde a uma representação do mundo real (FUNDAMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO, 2016).

Ainda, os dados matriciais são divididos entre *Rasters* Discretos e Contínuos:

- Os *Rasters* Contínuos são matrizes com variação gradual de dados ou cores, e representam os MDEs (Modelos Digitais de Elevação) e

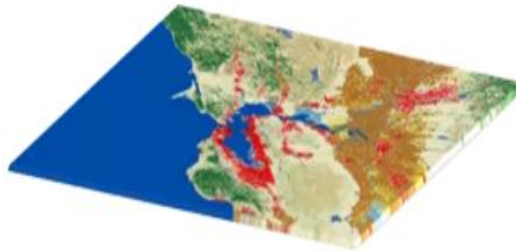
dados de variações de temperatura (GIS GEOGRAPHY, 2016), estes estão representados na Figura 14.



Continuous raster

Figura 14 – Representação de *Raster* Contínuo
Fonte: Adaptado de GIS Geography (2016).

- Os *Rasters* Discretos são características de diferentes topologias ou categorias, representam, por exemplo, o cobrimento superficial da terra, pois apresentam distinção clara dos limites entre duas regiões. Na Figura 15 está ilustrado esse modelo.



Discrete raster

Figura 15 – Representação de *Raster* Discreto
Fonte: Adaptado de GIS Geography (2016).

2.2.3.2 Dados alfanuméricos

Os dados alfanuméricos são informações descritivas dos elementos gráficos e podem ser subdivididos em dois tipos: Atributos dos Dados Espaciais e Atributos Georreferenciados (FUNDAMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO, 2016).

2.2.3.2.1 Atributos dos dados espaciais

São os atributos que fornecem informações descritivas de características de algum dado espacial, e estão ligados aos elementos espaciais através de identificadores comuns que são armazenados em ambas as bases de dados (FUNDAMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO, 2016). “Fornecem informações qualitativas ou quantitativas associadas às feições espaciais dos pontos, linhas ou áreas representadas na base de dados” (FUNDAMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO, 2016). Como exemplo pode ser citado a determinação das características geométricas, construtivas e de conversação de postes de energia espalhados ao longo de uma rua, em uma determinada região. No exemplo de feições lineares pode ser citado o número de faixas, condições do pavimento e número de acidentes em cada trecho de uma rodovia (FUNDAMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO, 2016).

2.2.3.2.2 Atributos georreferenciados

“São dados em que a preocupação é apenas georreferenciar alguma característica específica, sem descrever as suas feições espaciais” (FUNDAMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO, 2016). Como exemplo podem ser citados relatórios de acidentes em um estrada ou relatórios de crimes em diferentes bairros, são dados que não podem ser filtrados em segmentos maiores ou menores, pois caracterizam um evento de ocorrência aleatória e única sem depender das características espaciais do meio.

O SIG tornou-se uma poderosa ferramenta para visualizar e manipular, de forma separada ou conjunta, os diferentes tipos de dados e camadas (*layers* ou planos de informação), isso representa um grande avanço na tecnologia de análise de dados espaciais (ABREU, 2010). Na Figura 16 está ilustrada a sobreposição de diferentes temas de camadas de dados. “Apesar de visualizados separadamente, os dados estão interligados por sua localização espacial e relações topológicas” (ESRI, 2008 apud ABREU, 2010).

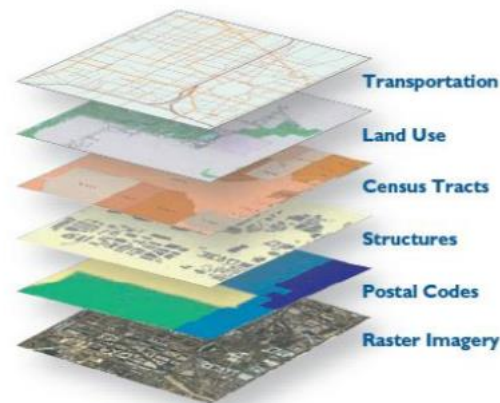


Figura 16 – Representação das Diferentes Camadas de Dados
 Fonte: ESRI (2008) apud Abreu (2010).

2.2.3.3 Componentes de um SIG

O SIG é composto por quatro elementos básicos que operam em um contexto institucional: *hardware* (equipamentos para execução dos programas), *software* (sistemas para processamentos dos dados), dados (de entrada e de saída) e profissionais (operadores dos sistemas) (FUNDAMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO, 2016).

- *Hardware* – pode ser qualquer tipo de plataforma computacional, periféricos de entrada (entrada de dados) e de saída (representação de resultados);
- *Software* – Sistemas específicos para análise de dados geoespaciais desenvolvidos em níveis sofisticados, constituídos por módulos que executam as mais variadas funções.
- Dado – Elemento fundamental de um SIG. Os dados geográficos são muito dispendiosos para coleta, armazenamento e manipulação, pois são necessários grandes volumes para solucionar importantes problemas geográficos.
- Profissional – Principal elemento de um SIG. É a pessoa responsável pela implantação, uso e manutenção do projeto. Sem pessoas capacitadas e com visão do contexto global, dificilmente o projeto terá êxito.

Existem vários Sistemas de Informação Geográficas que, em função de seus objetivos e necessidades, processam os dados de forma distinta, porém compartilham da mesma estrutura de relação entre seus componentes. A maioria dos programas apresentam alguns módulos similares, os quais estão listados a seguir (FUNDAMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO, 2016).

- Sistema de Aquisição de Conversão de Dados;
- Banco de Dados Espaciais e de Atributos;
- Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD);
- Sistema de Análise Geográficas;
- Sistema de Processamento de Imagens;
- Sistema de Modelagem Digital do Terreno – MDT;
- Sistema de Análises Estatísticas;
- Sistema de Apresentação Cartográfica.

Na Figura 17 está ilustrada a relação entre os componentes presentes em um SIG.

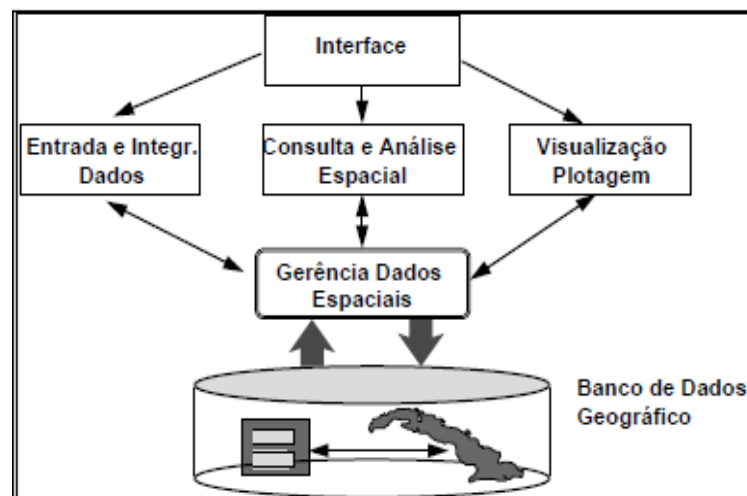


Figura 17 – Arquitetura dos Componentes de um SIG
 Fonte: Câmara; Medeiros (1998).

Na Figura 18 está ilustrada a inter-relação entre os dados de entrada, processamento de dados e dados de saída (resultados) manejados por um SIG. Todos os dados de entrada sejam mapas, imagens, ou dados alfanuméricos passam por um processo de análise e organização para que gerem resultados com informações construtivas para a tomada de decisão de um profissional, e integrem um banco de dados para a contiguidade dos resultados. Esses resultados podem

ser expressos em relatórios estatísticos, mapas com informações estatísticas, modelos digitais de elevação entre outros.

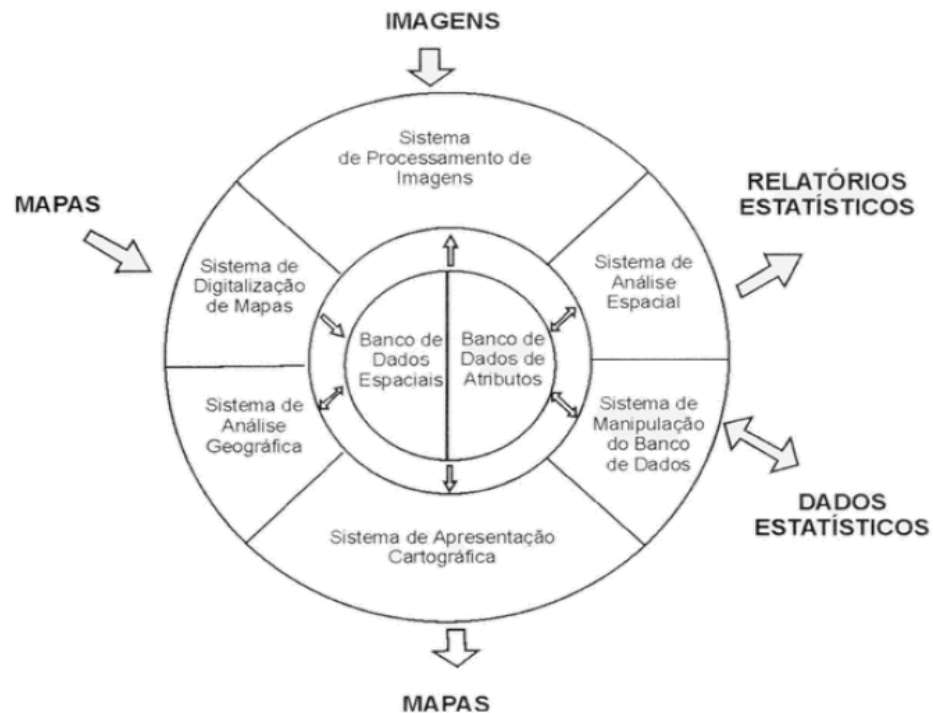


Figura 18 – Características de um SIG
Fonte: Fundamentos De Geoprocessamento (2016).

No mercado de programas computacionais SIG existem várias opções para escolha conforme a necessidade e a especificidade do problema. Alguns exemplos de programas computacionais SIG estão listados abaixo (GIS GEOGRAPHY, 2016):

- Esri ArcGIS - É o sistema mais utilizado mundialmente. Destaca-se pela praticidade no processamento de informações, pois gera respostas rápidas sem exigir muito do usuário.
- QGIS (*Quantum GIS*) – É o sistema aberto gratuito que mais cresce no setor de tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica. Possibilita criar, editar, visualizar, analisar e publicar informações geoespaciais sem custo. Oferece mais de 400 *plugins* entre integração de dados de arquivos CAD e geração de mapas de calor.
- GRASS GIS – (*Geographic Resource Analysis Support System*) é uma plataforma livre e gratuita que foi desenvolvida pela corporação de engenheiros do exército dos Estados Unidos da América. É muito utilizado no meio acadêmico para publicações.

- MapInfo *Professional* (Pitney Bowes) – Permite criar, editar e visualizar dados geoespaciais como qualquer outro sistema da área. É mais acessível que outros sistemas pagos, e pode ser uma opção viável para pequenos investimentos.
- SAGA GIS – (*System for Automated Geoscientific Analyses*) é um Sistema especializado em aplicações físicas de alto nível. Foi pioneiro em transformar sua plataforma aberta para pesquisas. Apresenta mais de 300 módulos para manuseio de dados matriciais (*Rasters*) e Vetoriais. Apresenta múltiplas janelas (histogramas, atributos, visualização de mapas, janela de impressão, entre outros).

De forma geral, o SIG pode ser utilizado em pelo menos três grandes áreas:

- Como ferramenta para produção de mapas;
- Como suporte para análise espacial de fenômenos;
- Como um bando de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial. (FUNDAMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO, 2016).

A ampla gama de aplicação dos SIGs em diferentes áreas seja na agricultura, florestal, cartografia ou em redes de suprimentos (água, energia e dados) reflete a importância relativa do tratamento de informações geográficas dentro de uma instituição, e ainda, aponta para uma perspectiva interdisciplinar de sua utilização (FUNDAMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO, 2016). A partir desses conceitos é possível citar algumas características principais que o SIG reúne:

- “Ter capacidade para coletar e processar dados espaciais obtidos a partir de fontes diversas, tais como: levantamentos de campo (incluindo sistema GPS), mapas existentes, fotogrametria, sensoriamento remoto e outros”;
- “Ter capacidade para armazenar, recuperar, atualizar e corrigir os dados processados de uma forma eficiente e dinâmica”;
- “Ter capacidade para permitir manipulações à realização de procedimentos de análise de dados armazenados, com possibilidade de executar diversas tarefas”;
- “Ter capacidade para controlar a exibição e saída em ambos os formatos gráfico ou tubular” (FUNDAMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO, 2016, p.5).

Para Câmara e Medeiros (1998) de uma forma abrangente, pode-se indicar que um SIG apresente os seguintes componentes:

- Interface com usuário;
- Entrada e integração de dados;

- Funções de processamento gráfico e de imagens;
- Visualização e plotagem;
- Armazenamento e recuperação de dados (organizados sob a forma de um banco de dados geográficos).

Basicamente a função de um SIG é integrar os dados geográficos aos atributos alfanuméricos alimentados pelo usuário, de forma que permita a filtragem de informações que gerem um resultado de interesse ao profissional responsável. Por exemplo, quando é necessário saber o número de cidades no Estado de São Paulo com população entre 100.000 e 500.000 habitantes; é necessário realizar uma filtragem nos dados excluindo as cidades que estejam fora do intervalo exigido (CÂMARA; MEDEIROS, 1998).

Para McCormac (2007, p.263) “um SIG pode ser expresso como um subconjunto de quatro tecnologias” listadas na Figura 19. Ele ainda realça que o SIG não pode substituir nenhuma dessas tecnologias inteiramente, porém ele compartilha de características em comum de cada uma.

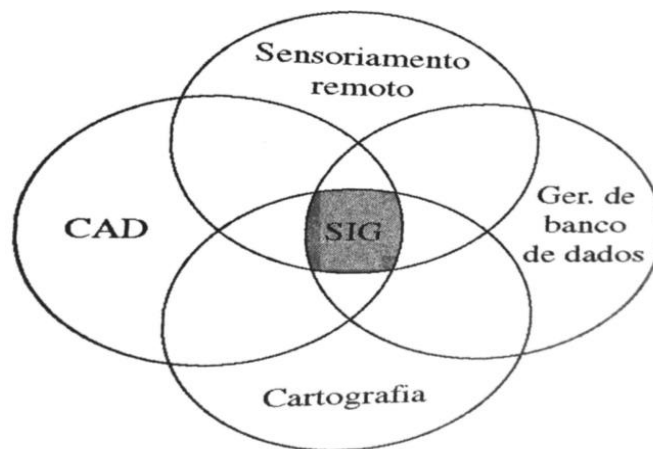


Figura 19 – Relações do SIG com quatro outros sistemas
Fonte: McCormac (2007, p.263).

A previsão para o futuro breve é que a sociedade e as decisões tomadas por entidades públicas dependerão inteiramente das informações providas pelo sistema de informações geográficas. Tal sistema, se utilizados de forma eficiente, pode auxiliar na determinação de localizações ótimas para estradas, ferrovias, aeroportos, utilidades públicas, subdivisões, estabelecimentos para comércios de varejo e instalações para resíduos perigosos. Esse sistema demonstra-se tão importante pois possibilita o confronto de várias informações geográficas de diferentes fontes (MCCORMAC, 2007). Por exemplo, a rota de um veículo de

emergência não é calculada pelo caminho mais curto, mas sim pelo caminho mais rápido. Isso envolve muitos fatores que devem ser confrontados para a determinação da rota; trânsito do percurso, programação de semáforos, bloqueio de rodovias, velocidade média transitada, volume de pedestres entre outras. O SIG tem a capacidade solucionar esse problema otimizando a rota que o veículo irá percorrer. “É provável que pelo menos 80% de informações de negócios estejam ligadas à geografia” (CASTLE, 1997, p. 16 apud MCCORMAC, 2007, p.266).

A utilização de VANTs como ferramenta para aquisição de dados para alimentar os SIG pode trazer inúmeros benefícios à sociedade, pois são equipamentos de fácil mobilidade, equipados com sensores de imagens avançados, podem fornecer informações precisas em tempo real, seja para problemas de segurança pública, tráfego terrestre ou tomada de decisões para obras de engenharia.

2.2.4 Sensoriamento Remoto

“O Sensoriamento Remoto pode ser entendido como um conjunto de atividades que permite a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade de contato direto com os mesmos” (MORAES, 2002, p.7). Basicamente é a tecnologia utilizada para aquisição de dados através de imagens coletadas, seja por equipamento aéreo ou satélites. O sensoriamento remoto teve início nos anos 60 e foi definido por Evelyn L. Pruit e colaboradores, sendo uma das melhores tecnologias de coleta automática de dados para a aquisição de dados em escala global (MENESES, 2012, p.1). Tecnicamente o Sensoriamento Remoto utiliza a energia eletromagnética, ou radiação eletromagnética, emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos para a aquisição, análise e detecção de informações referentes à superfície terrestre, aos oceanos, à atmosfera, ao magnetismo terrestre, etc (MORAES, 2002).

Graças à diferença do comportamento dos materiais com ação da energia eletromagnética em sua superfície, pode-se distinguir e alcançar um nível de detalhamento das características superficiais de um objeto através de sensores de

imagens a uma longa distância (MENESES, 2012). Moraes (2002, p.15) dá uma explicação um pouco mais técnica sobre o assunto: “o fluxo de energia eletromagnética ao atingir um objeto (energia incidente) sofre interações com o material que o compõe, sendo parcialmente refletido, absorvido e transmitido pelo objeto”. “Essas interações são determinadas pelas propriedades físico-químicas e biológicas desses objetos e podem ser identificadas nas imagens e nos dados de sensores remotos” (MORAES, 2002, p.7). Portanto, a REM (Radiação Eletromagnética) refletida por objetos é identificável e caracterizada de acordo com a quantidade de energia espectral refletida que varia conforme seu comprimento de onda. A interação entre os objetos e a REM não só depende das propriedades físico-químicas dos materiais, mas também da “textura, densidade e posição relativa das feições em relação ao ângulo de incidência solar e à geometria de imageamento” (CARMINATO; LEITE; PAMBOUKIAN, 2015). Devido a essas diferenças é possível distinguir diferentes objetos em uma imagem como a vegetação, a água, o solo e as rochas, pois cada material apresenta uma característica peculiar. Na Figura 20 é ilustrado o comportamento de refletância de materiais como a vegetação, solo e água conforme a variação do comprimento de onda eletromagnético incidente.

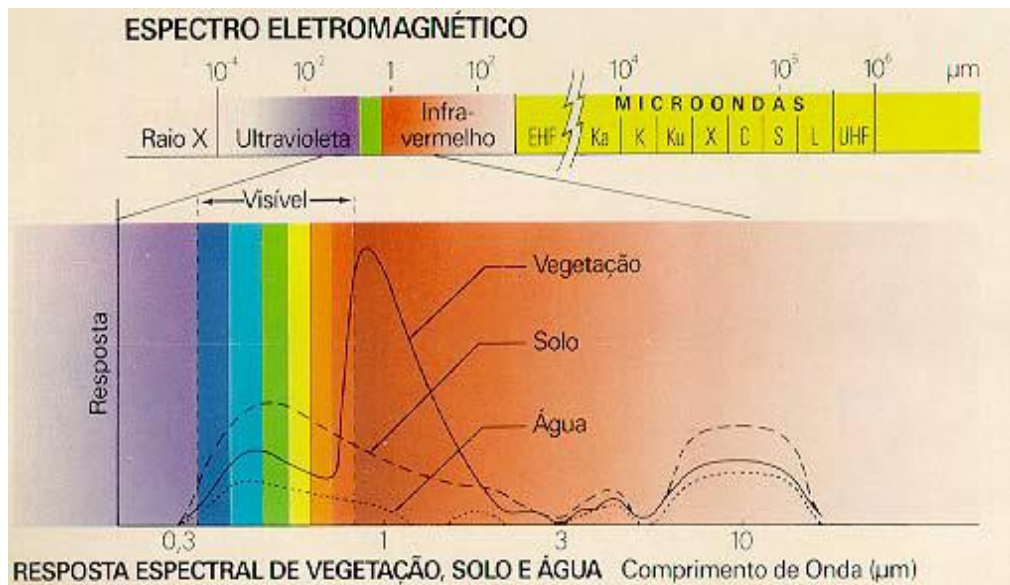


Figura 20 – Comportamento dos Materiais Sobre o Espectro Eletromagnético
 Fonte: Moraes (2002; p.10).

2.2.4.1 Espectro eletromagnético

O espectro eletromagnético é definido pela disposição ordenada e contínua da energia eletromagnética em função de seu comprimento de onda ou de sua frequência (MORAES, 2002). “As REMs são distinguidas nos sensores pela sua faixa espectral, denominadas como bandas de absorção” (CARMINATO; LEITE; PAMBOUKIAN, 2015). As bandas de absorção são classificadas conforme o tipo de processo físico que dá origem à energia eletromagnética, o tipo de interação que ocorre entre a radiação e o objeto alvo, e a transparência da atmosfera em relação à radiação eletromagnética (MORAES, 2002). “Cada banda de absorção corresponde a um comprimento de onda emitido pelo alvo. As bandas podem corresponder a emissões de infravermelho, ultravioleta ou de qualquer intervalo de comprimento de onda” (CARMINATO; LEITE; PAMBOUKIAN, 2015).

A visão humana consegue reconhecer apenas a energia eletromagnética correspondente ao espectro visível que varia de aproximadamente 400 a 700 nanômetros (10^{-9} metros) de comprimento. Todas as cores que o olho humano é capaz de perceber são combinações do vermelho, verde e azul. A combinação dessas três cores é denominada como teoria triestímulo da visão humana e serve como princípio para a tecnologia de sensores de imagem digital. É comum a utilização da sigla RGB (*Red, Green, Blue*) em temas relacionados à emissão de imagens. São essas cores que, da mesma forma como o olho humano, os sensores utilizam para sintetizar outras cores (CARMINATO; LEITE; PAMBOUKIAN, 2015).

Na Figura 21 estão ilustradas as faixas espectrais com seus respectivos comprimentos de onda, partindo do menor comprimento (raios gamas) ao maior comprimento (ondas de rádio AM), enfatizando o espectro visível da luz.

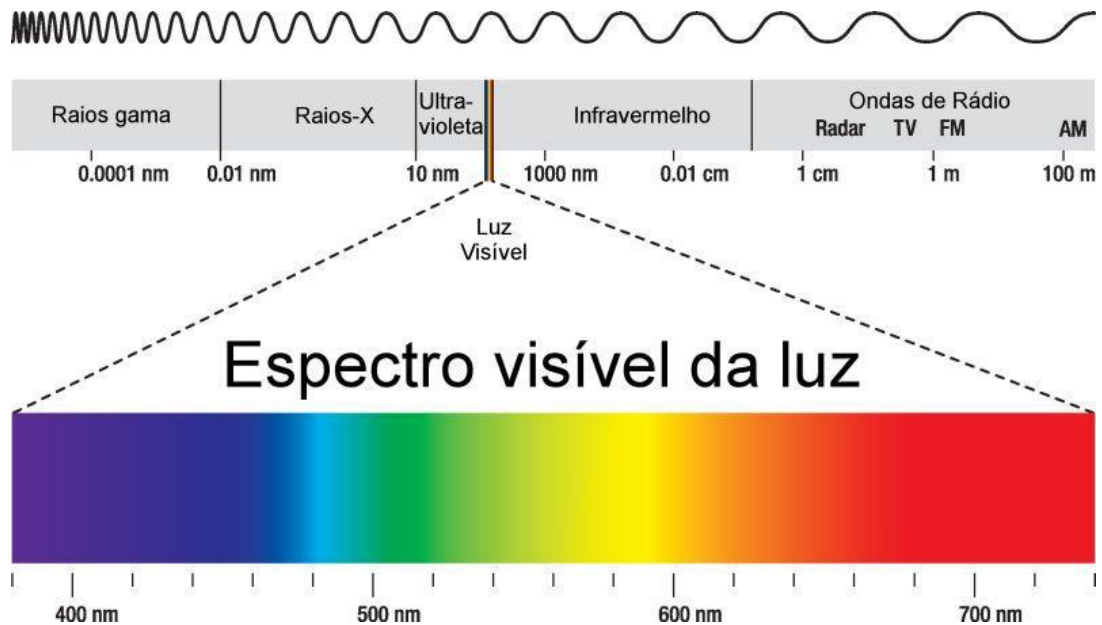


Figura 21 – Espectro das Ondas Eletromagnéticas Segundo seu Comprimento

Fonte: Carminato; Leite; Pamboukian (2015).

Na Figura 22 é ilustrada a interação entre a radiação eletromagnética e uma folha, representando a vegetação. Pela análise do gráfico de refletância com o comprimento de onda, é notável que a vegetação reflete em quantidade maior a REM infravermelho, isso explica por que é possível analisar a qualidade de uma plantação como uso de câmeras infravermelho; quanto menor o índice de refletância da banda infravermelho em uma plantação maior é a probabilidade dessa apresentar algum sintoma doentio.

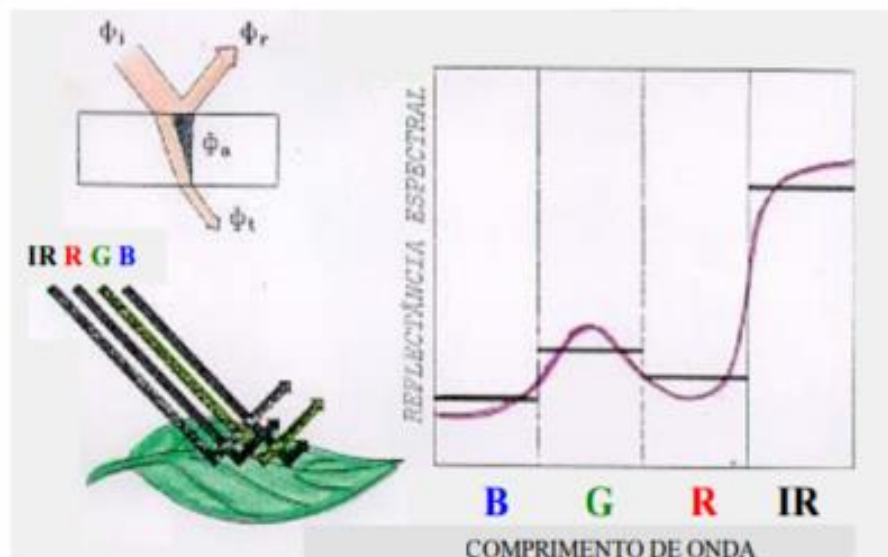


Figura 22 – Interação da Energia Eletromagnética com o Objeto

Fonte: Moraes (2002, p.16).

Para o sensoriamento remoto, o modelo ondulatório se aplica melhor para os grandes comprimentos de onda. Na Figura 23 está representada uma imagem de

radar em que as superfícies escuras (água e solo gradeado) representam os materiais em que a REM foi refletida em direção oposta à direção visada do sensor, desta forma, nenhuma radiação voltou ao sensor para ser registrada. Os outros níveis de cinza são representações de alvos com refletância difusa (tons de cinza variados) que retornaram ao sensor (MENESES, 2012).



Figura 23 – Imagem de Radar
Fonte: Meneses (2012, p.7).

É possível ressaltar em uma imagem certo elemento do alvo visado, em que deseja-se especificar melhor suas características, ou realçar sua presença perante os outros elementos da imagem. Para isso, é necessário filtrar a imagem para as bandas das quais maiores quantidades de REM são refletidas pelo elemento desejado. É possível realizar inúmeras combinações de bandas até que a melhor combinação para a finalidade do estudo seja encontrada (CARMINATO; LEITE; PAMBOUKIAN, 2015). Na Figura 24 está ilustrado um alvo sob a perspectiva de três bandas diferentes. Na parte inferior da figura estão representados dois exemplos de combinação de bandas, onde foram atribuídas cores diferentes para cada banda.

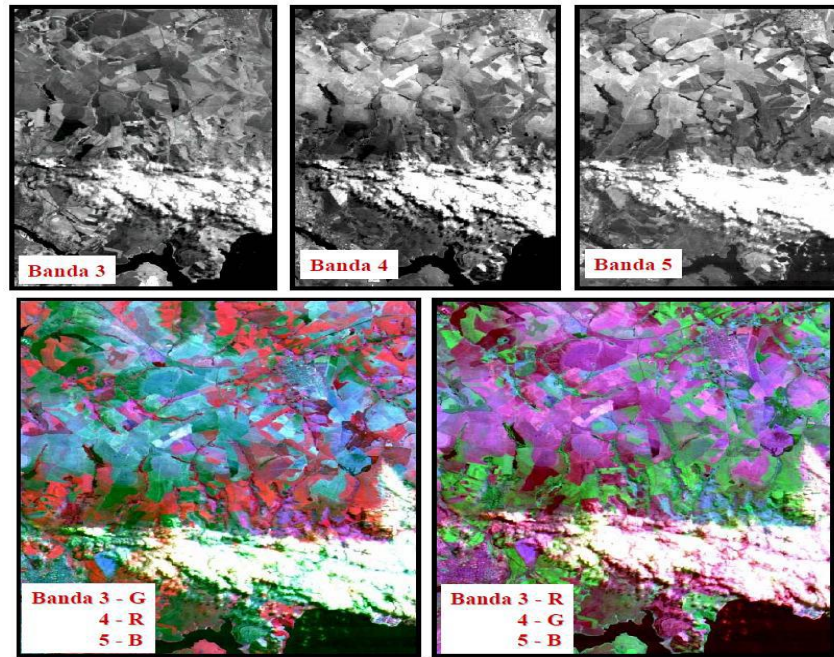


Figura 24 – Composição de Bandas
 Fonte: Carminato; Leite; Pamboukian (2015).

2.2.4.2 Sistema sensor

Os sensores são dispositivos capazes de detectar a radiação eletromagnética (em determinadas bandas de absorção) proveniente de objetos emissores, transformá-la em sinais elétricos e registrá-las para que sejam transmitidas em tempo real para posteriormente gerar informações que descrevam as feições dos objetos que compõem a superfície da Terra (MORAES, 2002).

Os sensores podem ser classificados em imageadores e não-imageadores. Os imageadores são sensores que fornecem como produtos imagens como os “*scanners*” ou câmeras fotográficas. Os não-imageadores são dispositivos que fornecem gráficos ou dados numéricos como resultado, são os radiômetros ou espectralradiômetros. (MORAES, 2002) Podem ainda ser classificados como ativos e passivos. Os sensores ativos são os que possuem fonte própria de emissão de REM, recebem parte do sinal refletido dos objetos das REM que os próprios equipamentos emitiram. Os passivos não possuem fonte própria de emissão de REM, portanto, o alvo observado por esse tipo de sensor emite REM proveniente da

energia solar ou emitida da própria superfície terrestre (MORAES, 2002; CARMINATO; LEITE; PAMBOUKIAN, 2015).

Os sensores são compostos pelas partes descritas a seguir:

- Coletor: é um componente óptico capaz de concentrar o fluxo de energia proveniente da amostra no detector;
- Filtro: é o componente responsável pela seleção da faixa espectral da energia a ser medida;
- Detector: é um componente de pequenas dimensões feito de um material cujas propriedades elétricas variam ao absorver o fluxo de energia, produzindo um sinal elétrico;
- Processador: é um componente responsável pela amplificação do fraco sinal gerado pelo detector e pela digitalização do sinal elétrico produzido pelo detector;
- Unidade de Saída: é um componente capaz de registrar os sinais elétricos captados pelo detector para posterior extração de informações (MORAES, 2002).

“A qualidade de um sensor é especificada pela sua capacidade de obter medidas detalhadas da energia eletromagnética. As características dos sensores estão relacionadas com a resolução espacial, espectral, radiométrica e temporal” (MORAES, 2002, p.19).

A resolução espacial é a capacidade de definição e distinção dos objetos pelo sensor (MORAES, 2002), indica a menor parcela imageada da superfície terrestre definida pelo tamanho do pixel (CARMINATO; LEITE; PAMBOUKIAN, 2015). A resolução espacial depende principalmente do detector e da altura do posicionamento do sensor em relação ao objeto (MORAES, 2002). Quanto menor for a área real representada por um pixel, maior será a resolução espacial da imagem, por exemplo, imagens em que um pixel corresponde a área real de 20 metros por 20 metros são de menor resolução do que as imagens em que área real correspondente é de 5 metros por 5 metros (CARMINATO; LEITE; PAMBOUKIAN, 2015). Para exemplificar esse conceito, na Figura 25 é comparada a resolução espacial entre três imagens capturadas por satélites sendo a imagem da esquerda com resolução de 30 metros; a do meio 10 metros e a da direita com 1 metro.



Figura 25 – Resolução Espacial de Imagens por Satélites
Fonte: Meneses (2012, p.26).

Para Carminato, Leite e Pamboukian (2015) “A resolução espectral está relacionada ao número de bandas situadas em diferentes regiões espectrais e com larguras estreitas de comprimentos de onda, o que permite distinguir um material do outro”. De modo similar Moraes (2002, p.20) define que:

“A resolução espectral define o intervalo no qual são realizadas as medidas, e conseqüentemente a composição espectral do fluxo de energia que atinge o detector. Quanto maior for o número de medidas num determinado intervalo de comprimento de onda melhor será a resolução espectral da coleta”.

A resolução radiométrica define a capacidade do sensor em detectar pequenas diferenças na energia refletida pelos elementos capturados na imagem. Como exemplo pode-se citar o sensor TM do Satélite Landsat 5 que distingue 256 tons distintos de sinais representados em 256 níveis de cinza (MORAES, 2002). Para Carminato, Leite e Pamboukian (2015) a resolução radiométrica é a intensidade de radiância (fluxo de REM) que provém da área de um pixel unitário.

A radiação temporal está relacionada ao período em que os satélites coletam informações de um mesmo objeto na superfície terrestre. (MORAES, 2002; CARMINATO; LEITE; PAMBOUKIAN, 2015).

2.2.4.3 Níveis de aquisição de dados

“Os sistemas sensores podem ser mantidos no nível orbital (satélites) ou suborbital (acoplados em aeronaves ou mantidos ao nível do solo)” (MORAES, 2002, p.21).

Ao nível do solo é realizada a aquisição de dados em campo ou em laboratório onde as medidas são obtidas com a utilização de radiômetros ou espectralradiômetros (MORAES, 2002).

No nível orbital a coleta de dados é realizada por sensores acoplados em satélites. Nesse nível o monitoramento é fácil monitorar os recursos naturais para grandes áreas da superfície terrestre, pois permite a repetitividade das informações de forma ágil (MORAES, 2002).

“No nível de aeronaves os dados de sensoriamento remoto podem ser adquiridos por sensores de varredura óptico-eletrônicos, sistemas fotográficos ou radares, e a resolução espacial dependerá da altura de voo.” (MORAES, 2002, p.21). Este último é o nível em que o presente trabalho atuará, pela coleta de imagens através de uma câmera fotográfica acoplada em um VANT, para aferição da precisão das medidas coletadas de um MDT.

2.3 FOTOGRAMETRIA

Segundo o ISPRS (2015) (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*), em português (Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto), a fotogrametria é a ciência e tecnologia de aquisição de informações sobre um objeto sem contato direto entre esse e um sensor. Para Santos (2007, p.38) a fotogrametria é “a ciência ou a arte de se obter medidas dignas de confiança, através de fotografias aéreas (aerofotos)”. A fotogrametria é a técnica que permite o estudo e a definição das formas, das dimensões e da posição de objetos no espaço, utilizando-se de medições obtidas a partir de fotografias ou imagens *Raster* (ROCHA, 2000 apud ZAIDAN, 2007).

Para Rocha (2000) a fotogrametria é dividida em duas áreas:

- Fotogrametria Métrica: envolve medidas precisas e computacionais para determinar a forma e as dimensões dos objetos, aplicada na elaboração de mapas planimétricos e topográficos.
- Fotogrametria Interpretativa: ocupa-se com o reconhecimento e identificação dos objetos.

Focando na parte técnica referente à geomática da ciência, a Aerofotogrametria é a técnica que tem por objetivo elaborar mapas mediante fotografias aéreas obtidas pela utilização de câmaras aerotransportadoras, com o eixo ótico posicionado na vertical ou diagonal, objetivando na obtenção de produtos estereoscópicos (ZAIDAN, 2007).

Segundo Zaidan (2007) O levantamento aéreo por imagem pode ser feito através de três categorias da fotogrametria:

Fotogrametria Analítica: É a evolução da fotogrametria analógica com a implantação de sistemas computacionais no processamento de dados e de imagens. Para o processamento de dados necessitava-se de um restituidor analítico aonde os princípios da estereoscopia eram utilizados para o processamento de dados. Na Figura 26 está ilustrado um restituidor analítico juntamente com a implantação do computador no processo.



Figura 26 – Exemplo de Restituidor Analítico
Fonte: Zaidan (2007, p.9)

Fotogrametria Digital: “é a parte da fotogrametria que trata dos aspectos geométricos do uso de fotografias, baseando-se no uso de imagens digitais, armazenadas em meio magnético, na forma de pixels”. Baseia-se no princípio da estereoscopia e na orientação analítico-digital das fotos. O posicionamento de pontos é realizado através do processo de triangulação fotogramétrica, sendo o passo seguinte a transferência de informações temáticas para o mapa, processo denominado restituição, ou ainda, compilação fotogramétrica.

Uma breve informação técnica de como a imagem digital é processada está explicada em (PRINCÍPIOS BÁSICOS DE FOTOGAMETRIA, 2008, p.2.26):

“A imagem digital é uma matriz composta por células quadradas, chamadas pixels (*picture elements*). Dentro de cada pixel, há somente uma coloração sólida, definida por um número digital. Neste momento, basta saber que cada número digital possui uma determinada coloração associada a ele. Os pixels podem ser melhor evidenciados se a imagem for sucessivamente ampliada”.

Considerando a afirmação acima, qualquer imagem digital pode ser definida através de uma matriz numérica, tendo o valor de cada elemento correspondente a uma cor equivalente. Nas Figuras 27 e 28 está representada essa lógica.

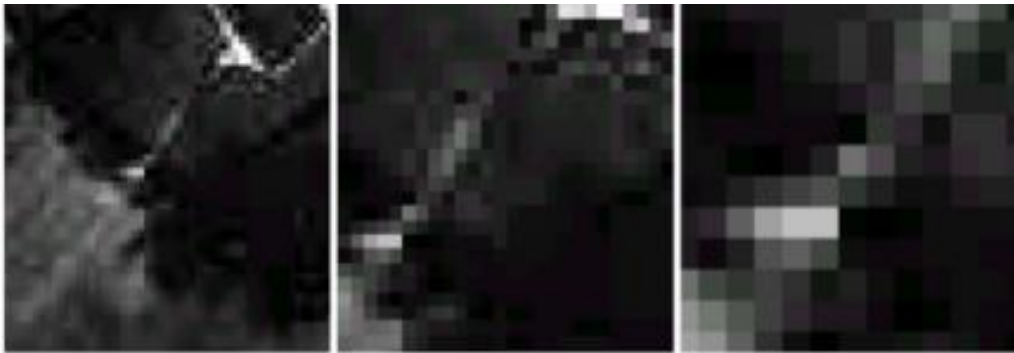


Figura 27 – A Estrutura de Pixels Existente na Imagem
 Fonte: Princípios Básicos de Fotogrametria (2008, p.2.26).

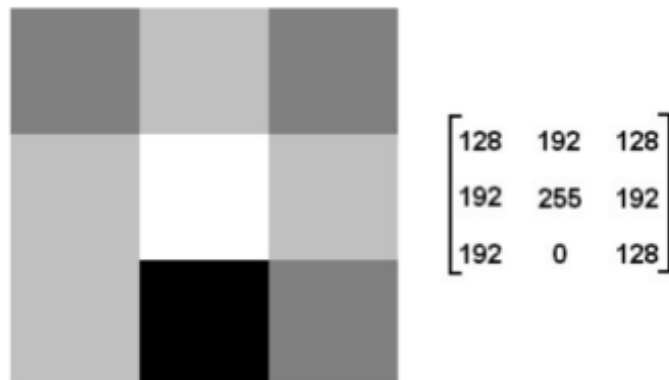


Figura 28 – Distribuição Matricial (à Direita) Equivalente a um Conjunto de Pixels (à Esquerda)
 Fonte: Princípios Básicos de Fotogrametria (2008, p.2.26).

2.3.1 Estereoscopia

Estereoscopia é um processo fotográfico que permite a visualização de imagens plana com a impressão de relevo. Para a obtenção de imagens com efeito estereoscópico deve-se fotografar simultaneamente em duas perspectivas diferentes a uma certa distância uma da outra. Através de *softwares* é possível conseguir o efeito estereoscópico através da sobreposição de imagens, sem a necessidade de captura com duas câmeras, para tanto necessita-se trabalhar com pares de aerofotos sequencialmente numeradas e transpostas (SANTOS, 2007).

2.3.2 Recobrimento

Santos (2007) afirma: para que haja a criação de uma imagem tridimensional necessita-se uma sobreposição longitudinal de fotos consecutivas de no mínimo 50%. Comumente, estabelece-se 60% de superposição longitudinal e 30% de superposição lateral ou entre faixas para garantir o recobrimento total da região. Nas Figuras 29 e 30 está ilustrado o plano de voo a ser respeitado.

Porém, se a finalidade for a obtenção de ortofotos, recomenda-se que o recobrimento longitudinal seja de 80% (SANTOS, 2007).

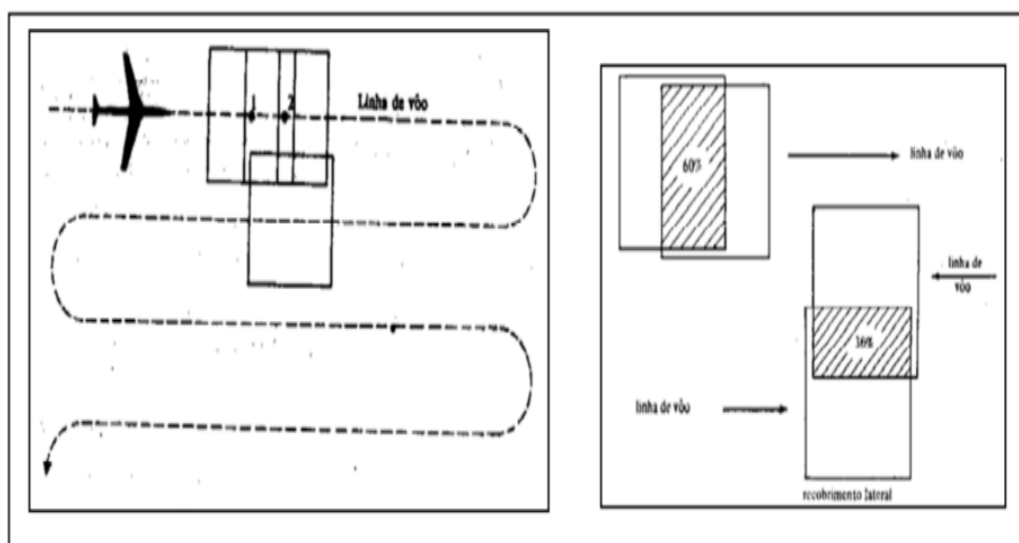


Figura 29 – Esquema de Voo (Recobrimento Longitudinal 60% e Lateral 30%)
 Fonte: Santos (2007).

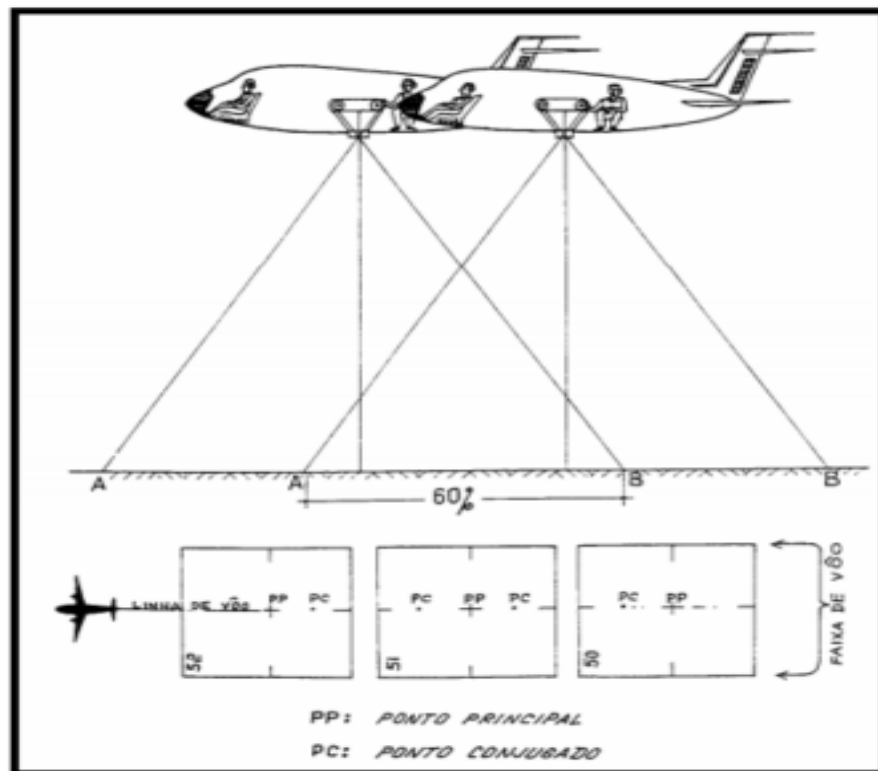


Figura 30 – Ponto Principal e Conjugado de uma Aerofoto
Fonte: Santos (2007).

2.3.3 Aerotriangulação

Kugler (2008) define a aerotriangulação como a densificação de pontos de controle nas fotos e no terreno para a correlação entre as imagens aéreas capturadas e o sistema de coordenadas do mapeamento. O objetivo da aerotriangulação é possibilitar a orientação das imagens captadas de forma que todos os pontos possuam uma coordenada relativa a um sistema de coordenadas pré-definido.

Schenk (1996) descreve o processo de aerotriangulação em quatro fases:

- Preparação: uma quantidade razoável, e bem distribuída, de pontos é escolhida de tal forma que estes pontos estejam presentes em mais de uma foto;

- Transferência de pontos: os pontos escolhidos devem ser marcados em todas as fotos onde estão presente. Na aerotriangulação manual esses pontos poderiam ser perfurados no próprio filme;
- Medição dos pontos: todos os pontos, incluindo os pontos de controle são medidos;
- Ajuste de blocos: os blocos de imagens são ajustados de tal forma que todos os pontos sejam sobrepostos e todas as medidas sejam iguais.

Softwares como o Pix4Dmapper fazem a aerotriangulação automaticamente, e através de visão computacionais e inteligência artificial é possível trabalhar com uma quantidade muito maior de pontos de ligação e conseqüentemente um resulta superior.

De acordo com o site da Pix4D² (2016) é a qualidade da aerotriangulação é afetada principalmente pelos seguintes fatores:

- Cobrimento: quanto maior o cobrimento entre fotos, melhor a qualidade da aerotriangulação, sendo que idealmente o mesmo ponto possa ser identificado em 5 fotos ou mais;
- Qualidade da imagem: quanto mais nítida a imagem maior o número de pontos extraídos;
- Quantidade de pontos de fácil identificação: geralmente mais pontos são extraídos de levantamentos em áreas urbanas que em áreas homogêneas (plantações, terrenos cobertos por neve, areia, etc).

Na Figura 31 está ilustrado um croqui de um plano de voo hipotético, com 6 faixas de sobreposição lateral, aonde os pontos vermelhos indicam os pontos de controle e os pontos verdes indicam os pontos de verificação.

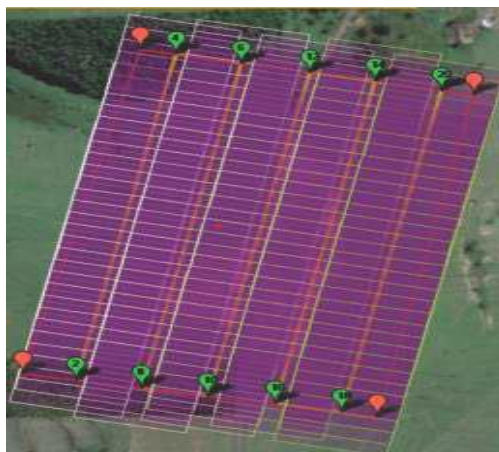


Figura 31 – Croqui do Plano de Voo
Fonte: DronEng (2016).

Na Figura 32 está ilustrado o processo de triangulação de imagens sobrepostas, cada foto apresenta pontos em comum com outras fotos consecutivas e o *software* de processamento reconhece esses pontos o que possibilita montar o mosaico de imagens e posteriormente gerar a nuvem de pontos.

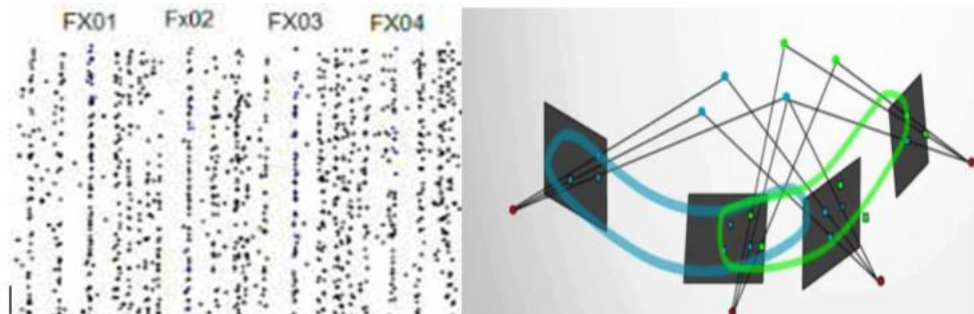


Figura 32 – Pontos de Ligação de Imagens para um Bloco Utilizando uma Câmera Digital

Fonte: Adaptado de DronEng (2016).

Na Figura 33 está ilustrado um croqui da área de rastreamento de um plano de voo realizado com uma aeronave da empresa Esteio ADS40, ilustrando a sobreposição lateral entre as faixas e o posicionamento dos pontos de controle (triângulos vermelhos).

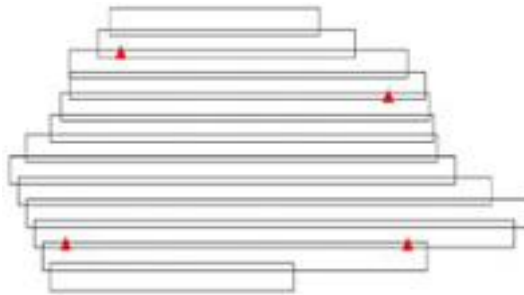


Figura 33 – Faixas de Rastreamento e Pontos de Controle

Fonte: Esteio Engenharia (2016).

2.3.4 *Ground Sample Distance (GSD)*

Segundo Kugler (2008) com a adoção dos equipamentos digitais de captura de imagem, o entendimento do fator escala de voo foi deixado de lado. Na sua essência, o conceito de relação entre um objeto no mundo real e sua representação fotográfica continua.

O GSD é comumente descrito como a resolução das imagens resultantes da aerofotogrametria digital, e representa o valor em unidades de distância real do objeto (usualmente em centímetros ou polegadas) que um pixel representa na imagem, por exemplo, uma foto com GSD igual a 2 centímetros informa que cada pixel da fotografia representa um quadrado de 2 centímetros aresta no terreno real. Na Figura 34 está ilustrada a explicação da sistemática da resolução da imagem, quanto menor for o GSD melhor é a resolução.



Figura 34 – Exemplo de Tamanhos de GSD
Fonte: Kugler (2008).

Neumann (2009) calcula o GSD de uma câmera digital de acordo com a seguinte fórmula:

$$\text{GSD} = \frac{h_g}{c_k} \times \text{CCD} \quad \text{Eq. (7)}$$

onde:

h_g = altura de vôo

c_k = distância focal

CCD = tamanho do pixel

Tanto a variável c_k quanto CCD são relacionadas à câmera, e o GSD um valor determinado de acordo com a necessidade do projeto. Portanto, podemos utilizar a mesma fórmula para definir a altura necessária de voo para alcançar a resolução ideal para as necessidades do projeto.

2.3.5 Pontos de Controle

Paine e Kiser (2012) afirmam que a aerofotogrametria apresenta dois principais problemas: a distorção e o deslocamento. A utilização de pontos de controle com coordenadas cartográficas ou relativas conhecidas são necessárias para corrigir esses problemas.

Os pontos de controle são pontos alvos naturais ou artificiais com sua latitude, longitude e altitude conhecidas. A partir destes pontos o *software* de processamento de imagem poderá atribuir localizações geográficas reais para cada ponto (*pixel*) do mosaico (PAINE; KISER, 2012). Nas Figuras 35 e 36 estão caracterizados cada ponto de controle. Na Figura 35 o ponto utilizado de referência foi o vértice inferior da faixa de pedestre mais externa da esquerda pra direita, enquanto que em áreas rurais, devido ao difícil caracterização de pontos marcantes, muitas vezes é necessário utilizar um ponto artificial em campo, um alvo que seja visível no levantamento aéreo (Figura 36).



Figura 35 – Pontos de Controle Natural do Terreno
Fonte: DronEng (2016).



Figura 36 – Ponto de Controle Artificial
Fonte: DronEng (2016).

2.3.6 Pontos de Verificação

Pontos de Verificação, assim como os pontos de controle, são pontos de coordenadas cartográficas conhecidas, porém não são utilizados no georreferenciamento nem para a costura das imagens. Esses pontos servem exclusivamente para a avaliação posterior da qualidade do mosaico resultante. Comparando as coordenadas retiradas do mosaico com as coordenadas reais levantadas através de GPS de alta precisão ou estação total, é possível avaliar a acurácia do levantamento e determinar se os resultados obtidos são satisfatórios conforme a finalidade do projeto (FONTES, 2005).

2.3.7 Modelo Digital da Superfície e Modelo Digital do Terreno

O Modelo Digital da Superfície, segundo Cruz (2011), é uma das inúmeras terminologias para designar modelos que representem a superfície terrestre e seu relevo.

Deve ser diferenciado o MDS (Modelo Digital de Superfície) do MDT (Modelo Digital do Terreno), pois o MDS representa a superfície acrescida de todo e qualquer

objeto que sobre ela possa interferir na refletância do pixel, ou seja, o modelo estará representando o topo de árvores, construções, carros e quaisquer outros objetos sem fazer distinção entre eles e o terreno.

Já o MDT representa a superfície real do terreno, *softwares* modernos, como o Pix4D e o PhotoScan fornecem ferramentas que possibilitam retirar objetos sobre a superfície do terreno através da interpolação de pontos adjacentes à área de interesse. Porém, para áreas densamente florestadas a precisão é relativamente baixa e outros equipamentos devem ser empregados para extração de dados confiáveis, como por exemplo, o uso do laser.

O modelo digital do terreno possibilita a extração de diversos dados de interesse do terreno, como:

- Volumes;
- Áreas;
- Perfis de seções transversais;
- Geração de imagens sombreadas ou em níveis de cinza;
- Geração de mapas de declividade e exposição;
- Geração de fatiamentos em intervalos desejados;
- Perspectivas tridimensionais.

O MDT é um dos principais produtos finais do levantamento aerofotogramétrico, pois é através deste modelo que engenheiros podem retirar informações importantes para auxiliar na tomada de decisão em um tempo curto. A representação do MDT é geralmente feita pela escala de cores cujas cores mais frias representam posições mais baixas e cores mais quentes representam posições mais elevadas. A representação do MDT está ilustrada na Figura 38 que pode ser comparada com a Figura 37 (representação do MDS) para analisar as diferenças entre os dois modelos.



Figura 37 – Exemplo de Modelo Digital de Superfície
Fonte: DronEng (2016).

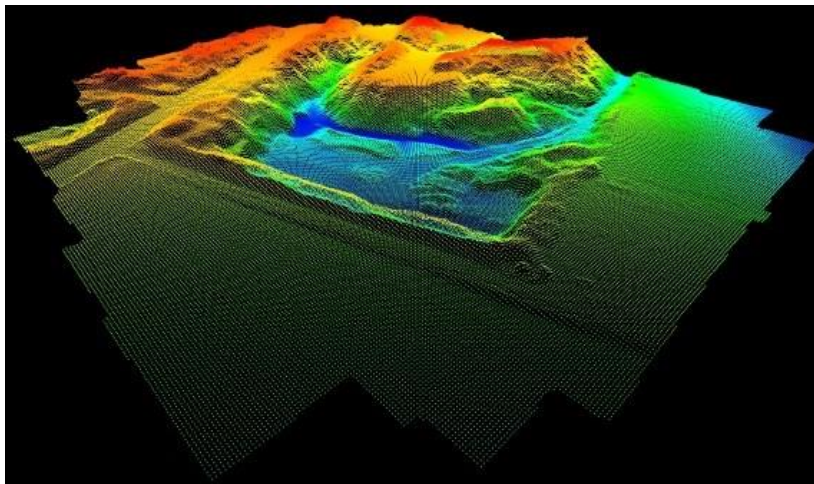


Figura 38 – Exemplo de Modelo Digital do Terreno
Fonte: DronEng (2016).

2.3.8 Ortofoto

A ortofoto é a foto após a correção de todas as deformações presentes na fotografia aérea, decorrentes da projeção cônica da fotografia. Duas correções são realizadas no processamento da ortofoto, a variação de escala entre o centro da foto e suas bordas e as variações de relevo, resultando em uma foto onde todos os pontos apresentam a mesma escala, possibilitando medir distâncias, posições, ângulos e áreas com precisão (MUNDOGEO, 2000). Na Figura 39 está ilustrada uma imagem 3D de uma ortofoto, enquanto que na Figura 40 está apresentado um comparativo entre uma imagem cônica e uma imagem ortogonal.



Figura 39 – Ortofoto em 3D da Av. Paulista, em São Paulo
Fonte: DronEng (2016).

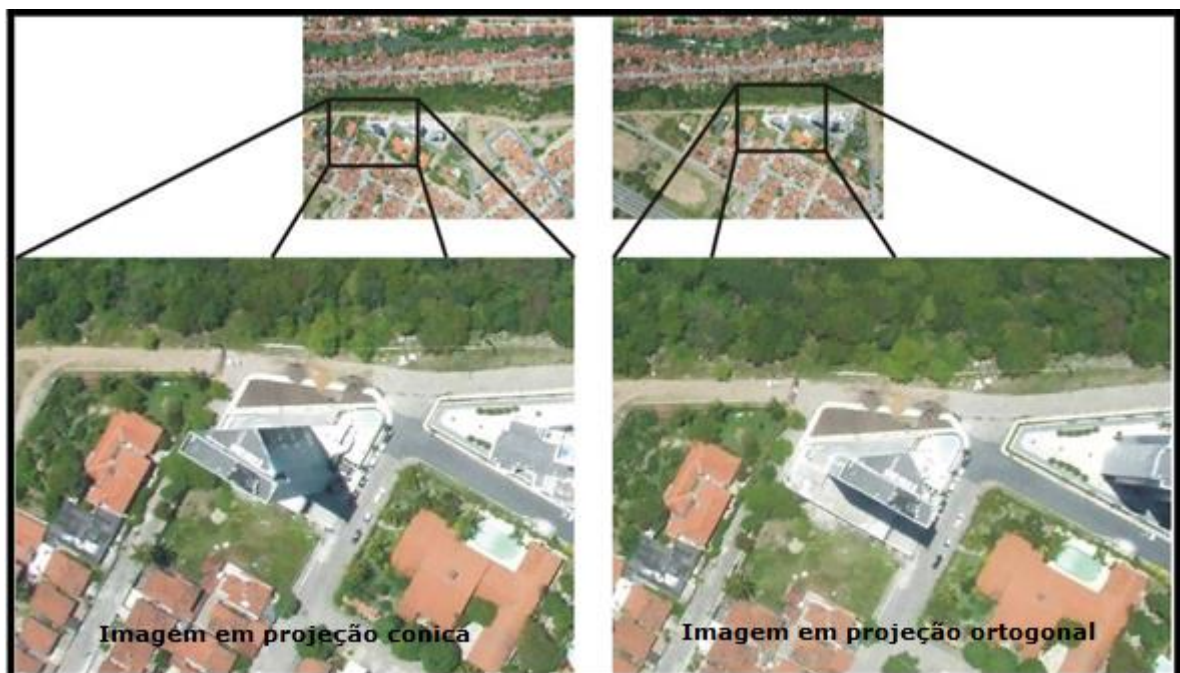


Figura 40 – Comparativo entre Imagens na Projeção Cônica e Ortogonal
Fonte: DronEng (2016).

2.3.9 VANTs / Drones

Veículos Aéreos Não Tripuláveis (VANTs) são pequenas aeronaves que podem ser autônomas (por programação prévia através de uma estação GPS), ou pilotáveis por um controle remoto que pode ser virtual (através de um tablete). Os VANTs, assim como os receptores GPS, tiveram sua primeira finalidade na área militar. Começaram sendo chamados de *Drones*, termo referente ao inseto zangão. Foi primeiramente denominado de tal maneira devido ao barulho que emite ao levantar voo. Atualmente, a maioria dos VANTs que oferecem capacidade de aplicação no campo da agricultura e da engenharia já são uma alternativa competitiva tratando-se de custo e tempo para as tecnologias convencionais de levantamento geodésico (SIEBERT; TEIZER, 2014).

Devido aos avanços tecnológicos, o investimento necessário nos SANTS (Sistemas Aéreos Não Tripuláveis) baixou vigorosamente não sendo mais um fator impeditivo para o emprego da tecnologia. Os fatores que definem qual tecnologia o investidor irá utilizar são as características de operação do equipamento: capacidade de carga, alcance, durabilidade, autonomia (SIEBERT; TEIZER, 2014).

Para a seleção adequada do VANT, algumas perguntas devem ser respondidas de forma a auxiliar o investidor na tomada de decisão.

- Qual é o tamanho da área a ser medida?
- Em qual altitude o VANT irá operar?
- Qual tipo de sistema de montagem e câmera é necessário?
- Existem pessoas trabalhando na área a ser sobrevoada?
- Existem outros obstáculos físicos presentes na área de atuação?
- Qual é o espaço disponível para o lançamento da aeronave?

Os VANTs podem ser classificados de acordo com o seu sistema de lançamento. Algumas vantagens e desvantagens estão relacionadas na Tabela 7 a seguir, e foram separadas de acordo com o sistema de lançamento da mini aeronave.

Tabela 7 – Comparação de Vantagens e Limitações dos Sistemas de Voo Existentes

Tipo de Aeronave	Alcance e Eficiência	Controle e Flexibilidade	Dependência climática	Capac. De Carga	Segurança	Simplicidade	Custo de Operação	Tempo de ajuste
Aeronave	Muito Bom	Médio	Ruim	Muito Bom	Bom	Bom	Ruim	Ruim
Aeroplano	Muito Bom	Ruim	Bom	Bom	Médio	Médio	Médio	Médio
Helicóptero	Médio	Muito Bom	Bom	Muito Bom	Ruim	Ruim	Médio	Bom
Multicóptero	Ruim	Muito Bom	Bom	Médio	Bom	Bom	Muito Bom	Muito Bom

Fonte: Siebert; Teizer (2014).

Para Siebert e Teizer (2014) os helicópteros de quatro hélices levam vantagens com relação aos outros modelos de VANTs, uma delas é o baixo custo operacional, investimento inicial, e de manutenção. Os quadricópteros levam vantagem também na flexibilidade devido à forma de lançamento. São equipamentos de fácil pilotagem, pois são fáceis de manter o controle quando sofrem ação de ventos fortes. Contudo, uma de suas maiores limitações é a autonomia de voo, a qual tem duração de apenas 20 a 30 minutos por bateria.

Graças à interação com receptores GPS no equipamento é possível utilizar alguns comandos que facilitam o manuseio e aplicação da mini aeronave. Com um *software* adequado pode-se traçar mais de 100 pontos de rotina para que o VANTs tire fotos e percorra um percurso previamente programado. Ou seja, se equipado com um receptor GPS e um *software* adequado, não há a necessidade de pilotar o equipamento durante o levantamento. Após o encerramento das atividades, basta acionar o comando “voltar para base” que o VANT realiza o percurso de volta automaticamente.

Na Figura 41 estão ilustrados os principais equipamentos desenvolvidos para a utilização dos VANTs em atividade.

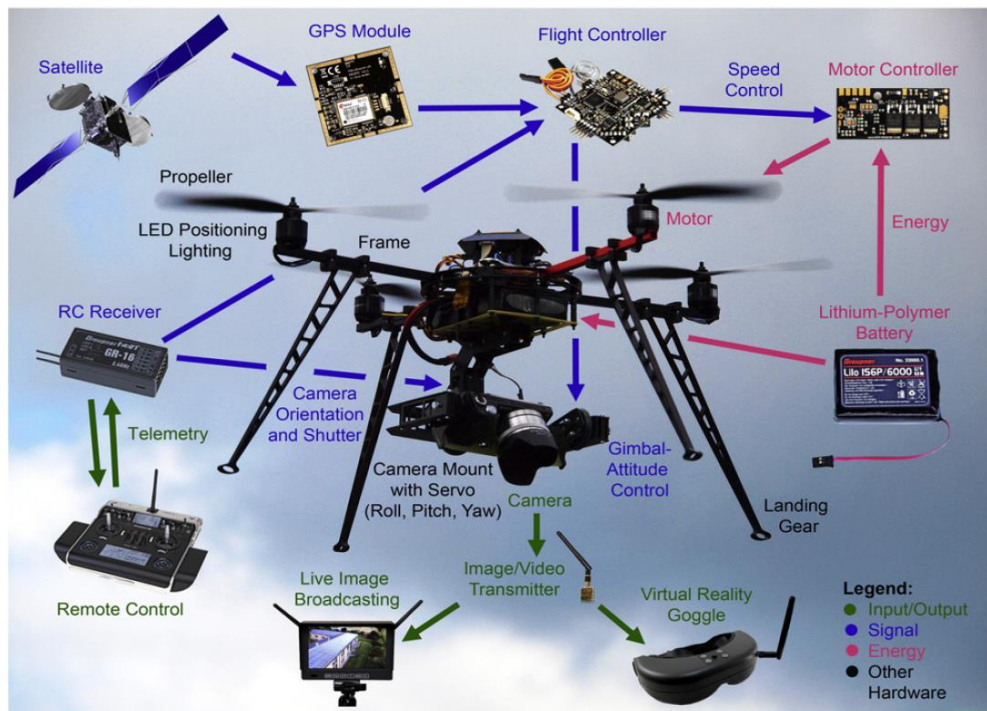


Figura 41 – Principais Componentes de um Sistema VANT
 Fonte: Siebert; Teizer (2014).

Existem alguns VANTs que apresentam a tecnologia de GPS-RTK embarcada, e inibem a necessidade de utilização de pontos de controle em campo. Essa vantagem facilita ainda mais o mapeamento aéreo através dessas mini aeronaves, podendo atingir acurácias na ordem dos centímetros sem a necessidade do apoio de uma estação total ou de um receptor GNSS secundário.

A empresa brasileira Xrobots lançou um sistema completo para mapeamento aéreo com tecnologia GPS-RTK embarcado no VANT desenvolvido pela própria empresa. O sistema contempla o Xplanner (*software* de planejamento de voo), o VANT Xechar 20C HA de asas fixas, e o computador de bordo que utiliza tecnologias aeronáuticas de MDD (*Model Driven Development*) e sistema operacional (QNX) desenvolvido pela empresa Embedded Systems (XMOBOTS, 2016).

2.3.10 Programas para Planejamento e Processamento de Dados

O processo de mapeamento aéreo com VANTs exige a utilização de alguns *softwares* para o planejamento e processamento de dados, alguns são gratuitos e

outros são pagos, a escolha de qual utilizar dependerá da afinidade com a interface e o custo benefício que cada programa oferece.

2.3.10.1 Programas de planejamento de voo

Os programas de planejamento de voo servem para determinar os parâmetros que a aeronave irá seguir durante o processo de aquisição de dados. Esses programas transmitem as informações para a controladora de voo acoplada no VANT para que esse realize todo o procedimento de forma automática. Quando a aeronave permite a decolagem e aterrissagem automática, o *software* faz todo o processo automaticamente basta o usuário configurar com antecedência o plano de voo desejado. Os parâmetros que podem ser configurados nessa etapa são:

- Altura de voo;
- Resolução do terreno (GSD) (depende da altura de voo);
- Velocidade máxima da aeronave;
- Área de interesse para o levantamento;
- Sobreposição longitudinal e lateral das imagens.

Esses programas geralmente não requerem alta capacidade de processamento, por essa razão, o *hardware* necessário para reproduzi-los também não precisa ser avançado, a maioria deles podem ser executados em *smartphones* com plataforma Android ou IOS. Esses *softwares* são gratuitos e alguns exemplos estão listados a seguir:

- Mission Planner (código aberto, utilizado apenas na plataforma Windows).
- Pix4Dcapture;
- DroneDeploy;
- Maps Made Easy;
- Mikrokopter *Flight Planning Tool* (MKFPT).

O Pix4Dcapture e o DroneDeploy fornecem configurações pré-estabelecidas para alguns VANTs comerciais mais utilizados como os Phantoms produzidos pela DJI, e o Bebop 2 produzido pela Parriot.

2.3.10.2 Programas de processamento de dados

Os programas de processamento de dados são as ferramentas pela qual os MDSs, MDTs e ortofotos são gerados. Os dados são importados dos programas de planejamento (imagens JPEG, RAW e arquivos Exif) gerando primeiramente um mosaico das fotos capturadas pelo VANT, em seguida a nuvem de pontos é gerada possibilitando a entrada das coordenadas dos pontos de controle para o georreferenciamento indireto do modelo. Os últimos passos são a criação do MDS, do MDT e da ortofoto da região.

Esses programas possuem versões gratuitas e profissionais as quais são pagas e variam bastante de preço. É recomendável utilizar um *hardware* com boa capacidade de processamento para reduzir o tempo de processamento dos dados e uma boa placa de vídeo para facilitar o manuseio dos modelos. Alguns exemplos estão representados no Quadro 2 juntamente com os requisitos mínimos necessário do sistema; o Quadro 3 apresenta alguns custos encontrados nos sites dos desenvolvedores.

Software	Configuração Mínima Recomendada		
	CPU	RAM	GPU
Agisoft - PhotoScan	Quad-core Intel Core i7 CPU, Socket LGA 1150 or 1155 (Haswell, Ivy Bridge ou Sandy Bridge)	DDR3-1600, 4 x 4 GB (16 GB total) or 4 x 8 GB (32 GB total)	Nvidia GeForce GTX 780 or GeForce GTX 980 (optional)
Pix4Dmapper	Intel(Intel i5/ i7) Xeon recomendável	Projetos Médios (100 a 500 imagens em 14 MP: 8 GB, 20 GB HDD Espaço Livre)	Qualquer GPU que seja compatível com OpenGL 3.2. (placa de vídeo integrada intel HD 4000)
Menci APS	i3 / i5 / i7 or equivalent	pelo menos 4GB	Nvidea Placa de Vídeo GeForce, ou nvidea Quadro (K410, K620)
Trimble - UAS Master	8 core ou maior	8GB DDR3	nvidea Placa de Vídeo Quadro 4000
Bentley - ContextCapture	8 core ou maior	8GB DDR3	Placa de Vídeo nvidea ou AMD compatível com OpenGL 3.2 com Memória DDR 1GB

Quadro 2 – Requisitos Mínimos Recomendados para o Sistema
Fonte: Os Autores (2016).

Software	Custo							
	Comercial				Educatonal			
	Profissional		Padrão		Profissional		Padrão	
	Compra	Aluguel / ano	Compra	Aluguel	Compra	Aluguel	Compra	Aluguel
Agisoft - PhotoScan	\$ 3.499,00	-	\$ 179,00	-	\$ 549,00	-	\$ 59,00	-
Pix4Dmapper	\$ 8.700,00	\$ 3.500,00	-	-	\$ 4.990,00	-	\$ 1.990,00	-
Menci APS	-	-	-	-	-	-	-	-
Trimble - UAS Master	-	-	-	-	-	-	-	-
Bentley - ContextCapture	-	-	-	-	-	-	-	-

Quadro 3 – Custo dos Softwares de Processamento

Fonte: Os Autores (2016).

2.3.11 Legislação

No Brasil a legislação que regulamenta o uso de VANTs civis ainda não foi aprovada e passa, neste momento, por um processo de consulta pública. A proposta da ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) (2015) que está em tramitação divide os VANTs em três classes de acordo com o peso máximo de decolagem do VANT.

- Classe 1: peso máximo de decolagem maior que 150kg;
- Classe 2: peso máximo de decolagem maior que 25kg e menor que 150kg;
- Classe 3: peso máximo de decolagem menor ou igual a 25kg.

Para a classe 3 não será exigida nenhum tipo de licença ao piloto, apenas que seja maior de 18 anos e que o voo se restrinja ao campo de visão do operador e que a altura de voo não ultrapasse 120m.

Já para os pilotos de classe 1 e 2, será exigido CMA (Certificado Médico Aeronáutico) de 5ª Classe válido, e licenças que serão determinadas pela ANAC caso a caso.

Um item que ainda não foi abordado pela ANAC são os voos para fins comerciais, até o momento não há diretrizes claras sobre como conseguir licenças, ou permissões, para uso comercial e a agência estuda individualmente cada

solicitação. A Figura 42 abaixo resume as principais restrições para cada categoria de VANT:

 DRONES DE ATÉ 2 KG	 DRONES DE 2 KG A 25 KG	 DRONES DE MAIS DE 25 KG	 DRONES DE ATÉ 2 KG	 DRONES DE 2 KG A 25 KG	 DRONES DE MAIS DE 25 KG
 Ficar a 30 metros de pessoas, prédios e do solo	 Ficar a 30 metros de pessoas e prédios e a 120 m do solo	 Realizado em espaço aéreo segregado e somente com autorização especial da Aeronáutica	 Não fazer acrobacias	 Não fazer acrobacias	 Realizado em espaço aéreo segregado e somente com autorização especial da Aeronáutica
 Voar com velocidade máxima de 55 km/h	 Voar com velocidade máxima de 110 km/h		 Operar só de dia	 Operar só de dia	
 Não se distanciar mais de 300 m do piloto	 Não se distanciar mais de 500 m do piloto		 Não chegar a 5,5 km de aeroportos e rotas de aviões e helicópteros	 Não chegar a 9,2 km de aeroportos e rotas de aviões e helicópteros	

Figura 42 – Restrições Impostas aos VANTs
Fonte: Gomes (2016).

2.4 RECENTES APLICAÇÕES DE VANTS EM ATIVIDADES DE ENGENHARIA

Existem alguns estudos de caso que analisaram os resultados de levantamentos obtidos com a plataforma VANT comparando-os com os resultados obtidos por equipamentos convencionais (estação total, GPS diferencial ou GPS-RTK). Cada estudo de caso tem suas peculiaridades, pois foram realizados em regiões diferentes, sob condições climáticas diferentes, utilizaram diferentes equipamentos de medição, diferentes recobrimentos e altura de voo, e diferentes *softwares* para planejamento de voo e processamento de resultados. No entanto, é importante conhecer as dificuldades, limitações e os resultados obtidos de cada pesquisa, pois muito se aprende com a experiência de outros autores sobre o tema. Isso possibilita assim, evitar erros recorrentes em outros levantamentos, estabelecer uma expectativa de acurácia dos resultados, aperfeiçoar o planejamento de voo de

forma a torna-lo mais ágil e que possibilite a melhor configuração de voo possível para a obtenção dos resultados esperados.

2.4.1 Comparação de Resultados Planialtimétricos Obtidos em Obras em Andamento.

Siebert e Teizer (2014) realizaram diferentes estudos sobre os resultados adquiridos pelos levantamentos fotogramétricos realizados por um VANT quando comparados aos resultados obtidos por equipamentos como a Estação Total e o GPS-RTK. Esses estudos foram realizados durante o acompanhamento de várias obras em tempo real e tinham como objetivo analisar os erros do levantamento planialtimétrico obtidos entre as diferentes metodologias citadas acima, e comparar as vantagens de operação de cada método.

Para realizar o levantamento aerofotogramétrico Siebert e Teizer (2014) montaram uma configuração de um VANT utilizando a estrutura de um quadricóptero composto por materiais leves em alumínio e fibra de carbono medindo 1 metro de diâmetro. A bateria de polímero de lítio com voltagem de 14,8 Volts e capacidade de 6600 mAh tem massa de 0,6 quilogramas totalizando 2,6 quilogramas de massa ao equipamento. Com essa configuração, a capacidade de carga do equipamento foi de 1,5 quilogramas o que possibilitou a utilização de uma câmera Sony NEX5N (16 milímetros de distância focal fixa com 16 Megapixels de resolução por imagem). O VANT foi equipado com um receptor GPS diferencial de baixo custo e com uma bússola magnética para orientação da aeronave. Para o voo automático uma controladora de voo foi aderida ao núcleo da aeronave a qual possibilitou a pilotagem autônoma em até 100 pontos pré-estabelecidos no plano de voo. Para maiores detalhes sobre a configuração e a montagem da aeronave consultar a Figura 41. Com essa configuração a aeronave teve autonomia de voo de 18 minutos voando a uma velocidade média de 4m/s (14,4km/h). O custo total do VANT foi de 8.000 dólares, o que é considerado baixo perante aos custos praticados pela aerofotogrametria convencional.

Para o planejamento do voo o *software* Mikrokopter *Flight Planning Tool (MK FPT)* foi utilizado como ferramenta para definir os parâmetros de voo e de aquisição

de imagens que influenciam no produto final do levantamento. Esses parâmetros são: sobreposição longitudinal e lateral entre imagens consecutivas, altura de voo, modelo da câmera, resolução da imagem, velocidade do voo, e a região de interesse a ser sobrevoada em um mapa interativo. Após alimentar o *software* com tais parâmetros, um plano de voo otimizado é definido pelo programa, demonstrando a área de cobertura do levantamento, a trajetória que o VANT irá seguir durante o voo, os *waypoints* aonde serão tomadas as fotos considerando a sobreposição entre elas.

Para o processamento dos dados e geração dos produtos finais (nuvem de pontos, ortofotos e MDT), os autores optaram por utilizar o *software* PhotoScan da empresa russa AgiSoft em cuja versão profissional é possível atribuir coordenadas georreferenciadas aos pontos de controle demarcados nas imagens aéreas. Isso é fundamental para que o resultado final do levantamento atinja uma acurácia aceitável. Os autores fizeram as análises em 4 obras em andamento as quais estão descritas nos tópicos abaixo.

2.4.1.1 Análise de erro absoluto de medidas coletadas em um estacionamento

O estacionamento utilizado para a análise comparativa entre as medidas obtidas pelo levantamento aerofotogramétrico e pelo levantamento topográfico com uma estação total tem dimensões de 100 por 150 metros. Aproximadamente 500 pontos foram demarcados sobre as faixas delimitadoras das vagas de estacionamento, e suas coordenadas foram obtidas nos planos (X,Y,Z) com a utilização de uma estação total. Suas coordenadas foram obtidas através do elipsoide WGS84 com acurácia aproximada de 1 centímetro no plano horizontal e vertical.

Para um primeiro teste comparativo realizado por Neitzel *et al* (2011), 6 pontos de controle foram utilizados para o georreferenciamento indireto, ou seja, para corrigir as coordenadas dos resultados gerados pelo VANT no *software* de processamento (PhotoScan). Com isso, os demais pontos, transformados pelas coordenadas corrigidas dos 6 pontos de controle, foram medidos e comparados com

os resultados obtidos pela estação total. O sistema utilizado para a aerofotogrametria foi um octacóptero produzido em 2009 equipado com uma câmera digital de 12 Megapixels (Canon IXUS100 IS). A aeronave sobrevoou a uma altura de 30 metros em relação ao nível do asfalto e captou 99 fotos com GSD de 0,7 centímetros por pixel. Para esse levantamento, um erro posicional médio de 5,6 centímetros e 2,5 centímetros de altura foi encontrado comparando os dois métodos.

Posteriormente novos levantamentos foram realizados utilizando o quadricóptero, anteriormente citado, equipado com a câmera Sony NEX5N em diferentes alturas de voo. Os autores notaram que para a altura de 50 metros com GSD de 1,2 centímetros os resultados eram melhores do que os obtidos a uma altura de 30 metros. Isso é explicado pela maior sobreposição das imagens na altura de 50 metros. Outra alteração significativa no levantamento foi a utilização de 9 pontos de controle ao invés de apenas 6 pontos, como utilizado no primeiro teste. Essa alteração minimiza a soma das reprojeções e dos erros de desalinhamento das coordenadas de referencia. Na Tabela 8 estão comparados as características e os resultados entre os dois levantamentos.

Tabela 8 – Comparativo entre Parâmetros do Levantamento

	Neitzel et al. 2011	Siebert and Teizer in 2012
Software	Agisoft PhotoScan Standard 2010	Agisoft PhotoScan Professional 2012
Altura de Voo	30 m (0.7 cm/pixel)	50 m (1.2 cm/pixel)
Pontos de Controle	6	9
Quantidade de Fotos	99	49
Erro médio posicional	5.6 cm	0.6 cm
Erro médio de altura	-2.5 cm	-1.1 cm

Fonte: Siebert; Teizer (2014).

Como apresentado na Tabela 8, apesar da resolução espacial para a altura de 30 metros ser maior do que para a altura de 50 metros, o erro médio horizontal e vertical para a segunda configuração foi menor pois, como dito anteriormente, a sobreposição entre as imagens e o número de pontos de controle foram maiores no segundo levantamento, considerando também a diferença entre as características das câmeras digitais e dos VANTs. O erro máximo de um único ponto, encontrado no segundo levantamento, foi de 4,9 centímetros na horizontal e 6,4 centímetros na vertical.

Os erros obtidos no último levantamento foram expressos na Figura 43. Na imagem à esquerda, a espessura das flechas indica a proporção do erro em uma

determinada localização, enquanto que na imagem à direita, o tamanho do círculo representa o erro obtido no eixo vertical Z.



Figura 43 – Representação Gráfica de Erros Absolutos em Estacionamento
 Fonte: Adaptado de Siebert; Teizer (2014).

Siebert e Teizer (2014) citaram alguns fatores que podem ter influenciado significativamente para a aquisição de melhores resultados:

- Maior sobreposição entre fotos consecutivas;
- Transposição das coordenadas georreferenciadas diretamente no *software* de processamento;
- Medir diretamente os pontos de verificação diretamente no *software* de processamento;
- Aperfeiçoar os parâmetros das câmeras com o auxílio dos pontos de referência.

2.4.1.2 Análise de custo-efetividade da utilização de VANT para atividades de aterro

Siebert e Teizer (2014) realizaram uma análise comparativa do processo de aquisição de dados entre o levantamento realizado com o VANT montado pelos autores e um levantamento realizado com um GPS-RTK. A Área de estudo foi uma

região próxima à cidade de Magdeburg na Alemanha, e o objetivo do projeto é recuperar a área superficial degradada pela exploração mineral do solo, ou seja, reaterrar a área explorada de 200 por 300 metros que está ilustrada na Figura 44. A representação “A” ilustra o levantamento cinemático em tempo real elaborado pelo receptor GPS usando centenas de pontos aferidos em um levantamento manual, enquanto que a parte “B” ilustra o levantamento fotogramétrico realizado pelo VANT para coleta automática de milhões de pontos de medição coloridos, representados em uma ortofoto.

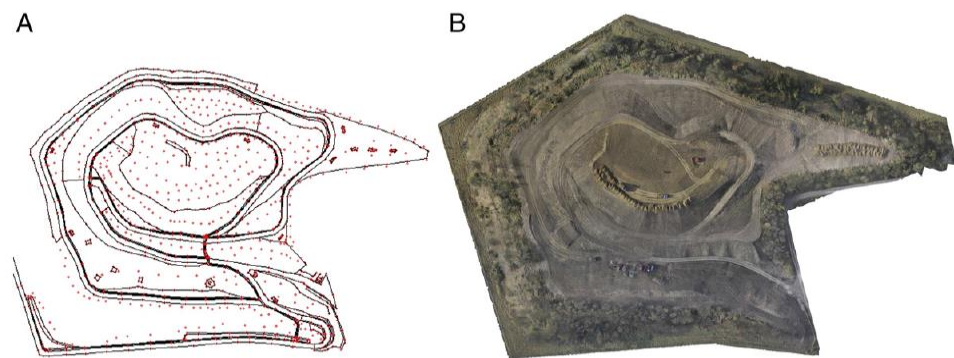


Figura 44 – Comparação entre Resultados Gerados pelo Receptor GPS-RTK (A) e pelo VANT (B)

Fonte: Siebert; Teizer (2014).

As áreas de exploração de minério permitem alta efetividade na aquisição de resultados aerofotogramétricos, pois não apresentam vegetação alta, obstruções de equipamentos artificiais ou alta aglomeração de pessoas, assim sendo, a análise é menos dispendiosa e requer menos intervenções manuais no local de estudo (SIEBER; TEIZER, 2014). Para planejamento de voo foi determinado uma sobreposição longitudinal e lateral de 60 e 40% respectivamente, com a altura de voo de 75 metros em relação ao ponto mais alto do local. Oito pontos de controle foram utilizados para georreferenciar o modelo digital aerofotogramétrico. Os parâmetros anotados em cada procedimento estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Comparativo entre Dados de Processamento do Levantamento

Método de Levantamento	RTK GPS survey	UAV photogrammetric mapping
Área de Cobertura	60,000 m ²	60,000 m ²
Tempo Necessário	Preparação	40 min
	Gravação	15 min
	Avaliação/ Processamento	150 min
	Total	205 min
Número de Pontos	1800	5,500,000 (not all might be used)
Densidade de Pontos	0.03 points/m ²	92 points/m ²
Resultado	Modelo de Superfície Interpretado	Modelo de Superfície Densa, Ortofoto

Fonte: Siebert; Teizer (2014).

Os resultados da Tabela 9 mostram que o tempo de coleta de dados utilizando o VANT foi de apenas 3% do tempo gasto com o GPS-RTK; o tempo total do procedimento para a obtenção do resultado final foi de um terço do tempo utilizado pela tecnologia do GPS-RTK. Além disso, a densidade de pontos por metro quadrado da malha de pontos da área levantada para a aerofotogrametria foi 3066 vezes mais densa do que a obtida pelo receptor GPS-RTK. Contudo, os autores citaram algumas dificuldades durante o procedimento realizado com o VANT. Devido à ação do vento sobre a aeronave algumas fotos tiveram que ser manualmente removidas, pois apresentaram ruídos e manchas nas imagens. Um voo teve que ser cancelado devido à velocidade do vento estar superior a 40 km/h. causando a instabilidade da aeronave. Alguns equipamentos e máquinas tiveram que ser removidas do local para evitar obstruções e sombreamentos nas imagens. Uma das principais desvantagens do levantamento fotogramétrico é o processo de classificação de pontos individuais na geração da malha de pontos, pois este processo não é automático, enquanto que no procedimento utilizando os receptores GPS-RTK existem códigos de pontos padronizados que identificam e classificam cada ponto, por exemplo, pontos pertencentes a uma trincheira ou a uma rodovia.

A principal vantagem da utilização da aerofotogrametria para atividades de engenharia é a criação da ortofoto da área analisada, pois estas são representações geometricamente corrigidas do mosaico montado pelas imagens capturadas. A ortofoto representa as características da superfície do terreno a uma escala constante através da imagem. Isso possibilita a aquisição de medidas, áreas e seções transversais do perfil do terreno (SIEBERT; TEIZER, 2014).

2.4.1.3 Resultados de levantamentos de terraplanagem durante a construção de rodovia

Grandes construções como obras de rodovias exigem a movimentação de grandes volumes de terra, por isso, é importante estimar esses volumes para garantir um planejamento adequado, que minimize o retrabalho das máquinas e otimize a utilização dos recursos. A área estudada está localizada na cidade de Friedewald na Alemanha, e corresponde ao alargamento de uma rodovia já existente na região. Siebert e Teizer (2014) escolheram 3 regiões específicas para avaliar a diferença dos resultados obtidos pelo levantamento realizado pela Estação Total e pelo VANT. Essas regiões estão ilustradas pela ortofoto gerada pelo VANT na Figura 45, e correspondem a uma área maior de 8300 metros quadrados e outros três pequenos morros de terra.

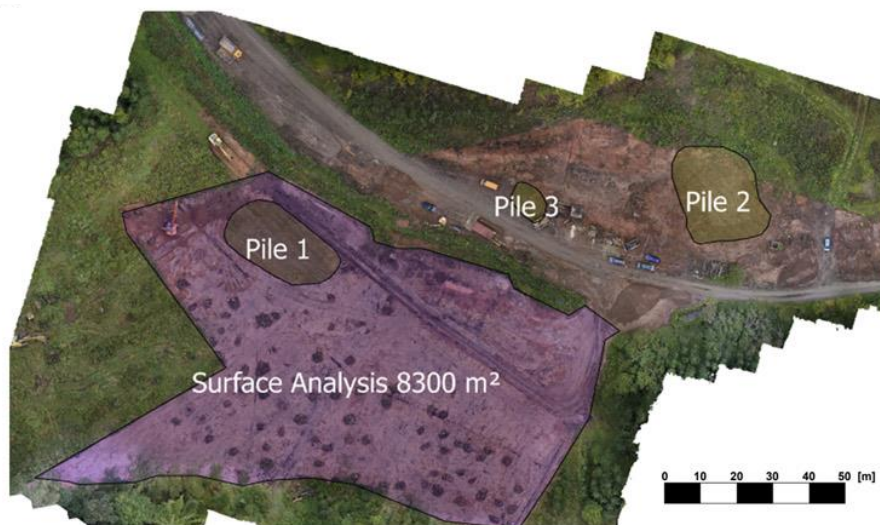


Figura 45 – Área de Análise dos Resultados
Fonte: Adaptado de Siebert; Teizer (2014).

Para o planejamento de voo do VANT os autores optaram por utilizar a altura de 70 metros, com recobrimento longitudinal e lateral entre as fotos de 80 e 60% respectivamente. Oito pontos de controle foram utilizados para o georrefenciamento indireto do MDS, processo necessário para melhorar a acurácia do modelo, já explicado no tópico 2.3.5. Seguindo tais parâmetros, um total de 64 imagens foram obtidas, proporcionando um GSD de 2 centímetros por pixel e um erro estimado horizontal de 2 e vertical de 6 centímetros. O procedimento realizado com a Estação Total gravou 202 pontos para aferição das medidas, enquanto que o procedimento

realizado pelo VANT gravou 122.275 pontos. A área sobreposta entre os levantamentos para comparação dos resultados foi de 7.761 metros quadrados, e está ilustrada na Figura 46 que representa, em uma escala de cores, um mapa de elevação da superfície, onde a cor azul representa regiões mais baixas e a cor vermelha regiões mais altas. Os círculos em amarelo representam a dimensão da diferença entre as medidas de cota entre os dois métodos em posições específicas, sendo os círculos maiores representantes de maiores diferenças.

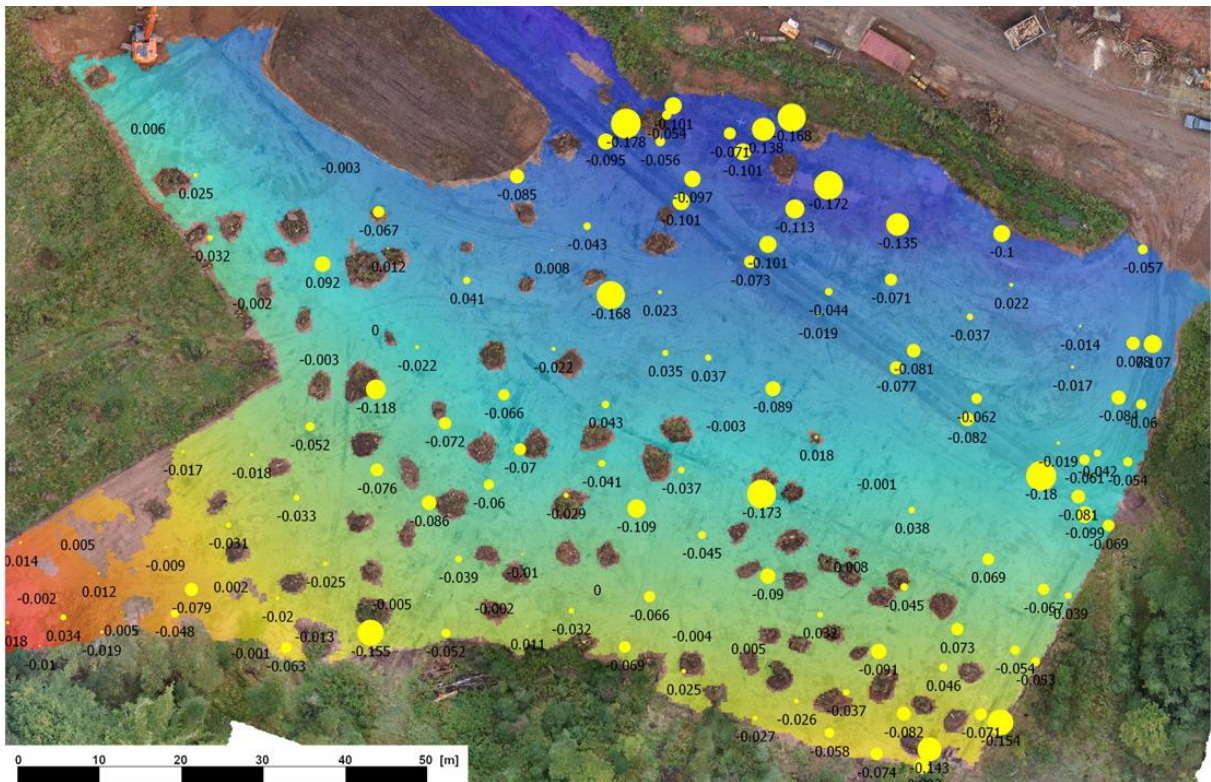


Figura 46 – Erro Altimétrico Absoluto (em Metros) entre os Levantamentos
Fonte: Siebert; Teizer (2014).

As medidas negativas e positivas na Figura 46 indicam o erro absoluto dos valores obtidos pelo VANT com relação aos coletados pela Estação Total. O erro médio encontrado entre os levantamentos foi de 4,2 centímetros com um desvio padrão de 5,9 centímetros.

Considerando o cálculo de volumes, subtraindo-se os dois modelos, os autores encontraram uma diferença volumétrica de 149 metros cúbicos em uma área de 7.761 metros quadrados. Isso gera uma altura média de 1,9 centímetros de diferença ao longo da área estudada ($149 \text{ m}^3/7761 \text{ m}^2$), ou seja, o MDS gerado pelo processamento dos dados do VANT está 1,9 centímetros mais alto que os dados coletados pela Estação Total.

Algumas possíveis causas para essas diferenças estão listadas abaixo e foram motivadoras para uma nova análise comparativa que foi realizada nos três morros ilustrados na Figura 45.

- A espessura dos pontos de controle pode ter influenciado as medidas, por exemplo, os pontos utilizados para referência podem ter espessuras de 1 centímetro;
- O Prisma utilizado para o levantamento com a Estação Total pode ter uma leve penetração no terreno, causando uma tendência de medidas altimétricas menores;
- Áreas com vegetação ou poças de água que não podem ser medidas ou são evitadas utilizando a Estação Total;
- Número de pontos de aferição de medidas, por exemplo: a maior quantidade de pontos de aferição utilizados pelo VANT produzem resultados mais precisos, pois a resolução dos modelos para aferição das medidas é mais densa.

Os resultados da análise realizada nos morros de terra estão apresentados na Tabela 10, que mostram uma diferença entre os volumes obtidos pelos dois levantamentos de 8 a 16%.

Tabela 10 – Comparativo entre os Resultados Volumétricos

	Area	RTS		UAV		Error	
	[m ²]	[m ³]	Points	[m ³]	Points	[m ³]	[%]
Pile 1	443	730	29	789	3877	59	8%
Pile 2	440	997	40	1090	2617	93	9%
Pile 3	95	81	24	95	454	14	16%

Fonte: Siebert; Teizer (2014).

Os autores concluíram que devido à Estação Total coletar menos pontos de aferição para o cálculo do volume em comparação ao procedimento realizado pelo VANT, assume-se que os volumes calculados por este aproximam-se melhor dos valores reais, ou seja, os resultados são mais acurados do que os obtidos pela Estação Total. Contudo, para validar a proposição, seria aconselhável dispor de um terceiro levantamento utilizando um equipamento de escaneamento a *laser*, desta forma, os resultados poderiam ser comparados entre si possibilitando uma conclusão mais precisa. Sabe-se, no entanto, que a utilização de tais equipamentos

é inviável devido ao tempo de processamento dos dados e aos custos inerentes ao procedimento. Para um estudo científico pode ser interessante tal comparativa, porém, para atividades práticas os resultados apresentados pela Estação Total, apesar de utilizarem menos pontos de aferição que os demais, já apresentam resultados satisfatórios para os engenheiros em campo.

2.4.1.4 Resultados aerofotogramétricos para a construção de ferrovia e aterro de solo

Obras de ferrovias para trens de alta velocidade geralmente requerem precisão milimétrica na construção dos trilhos. Conseqüentemente, é importante o engenheiro de campo ter controle sobre as possíveis variações que possam ocorrer do projeto. O VANT pode ser uma ferramenta essencial para gerar relatórios de acompanhamento rotineiros sobre essas variações. Um exemplo disso foram os resultados gerados pelo acompanhamento de Siebert e Teizer (2014) em um trecho de 330 metros da construção da ferrovia de alta velocidade entre as cidades de Erfurt e Nuremberg na Alemanha. A obra envolveu o corte de aproximadamente 0,7 milhões de metros cúbicos de terra que foi remanejada para uma área próxima à obra. Na Figura 47 estão ilustrados o trecho da obra e as seções de corte e aterro representadas pelas cores azul e vermelha respectivamente.

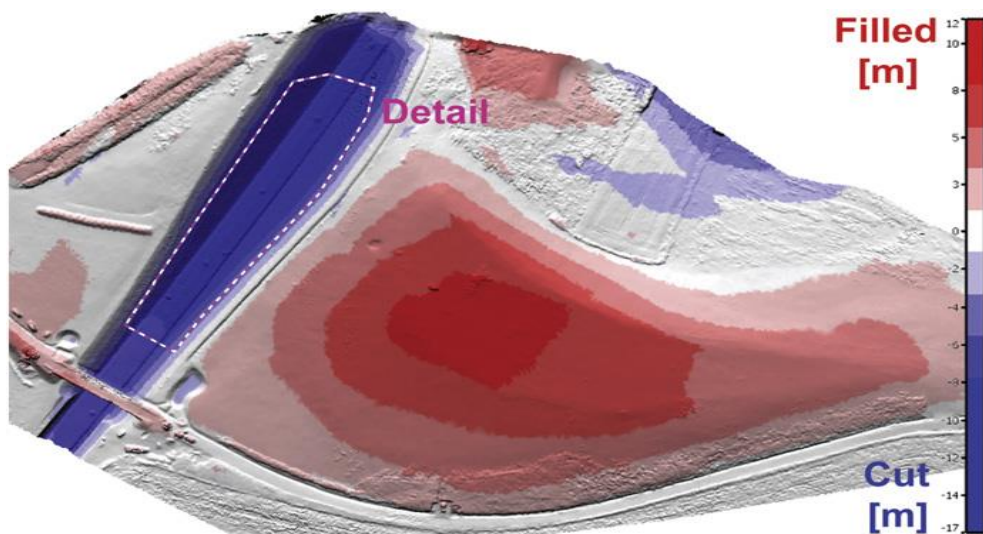


Figura 47 – Trecho de Corte e Aterro para Obra de Ferrovia
Fonte: Siebert; Teizer (2014).

O proprietário e o Gestor de Qualidade da obra queriam certificar se os marcos de construção da base dos trilhos tinham sido construídos, e saber a localização e a proporção das variações das medidas em relação ao planejamento. Como resultado do levantamento, a seção transversal de um trecho da obra apresentando o traçado realizado (*as-built*) do corte e o traçado de projeto (*as-planned*) foi apresentada aos responsáveis e está ilustrada na Figura 48.

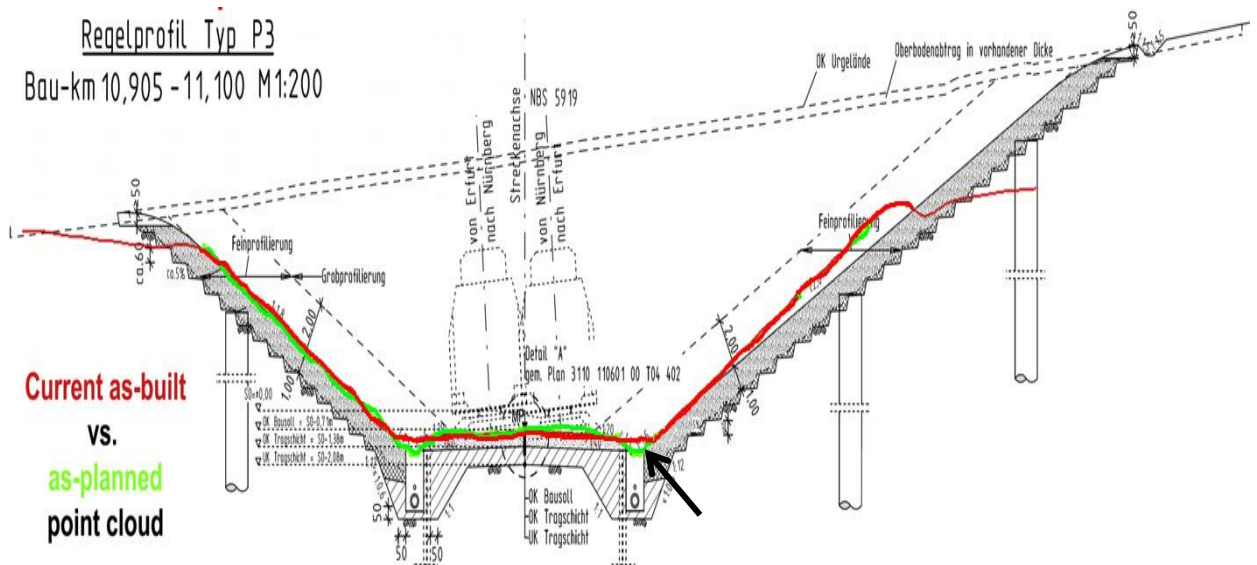


Figura 48 – Seção Transversal da Ferrovia
Fonte: Adaptado de Siebert; Teizer (2014).

Pela análise das curvas na Figura 48 da seção transversal é possível notar as pequenas variações entre o projeto e o elaborado. Além disso, nota-se que a vala de drenagem nos cantos da ferrovia foi negligenciada até o momento do levantamento, indicada pela flecha em preto no canto direito da Figura 48. Outro resultado gerado pela análise do Modelo Digital de Elevação (MDE) está ilustrado na Figura 49, onde estão representadas as regiões que precisam ser cortadas ou preenchidas conforme o limite estipulado na barra indicadora à direita. Nessa representação a cor vermelha representa a região que deve ser cortada enquanto que a cor azul representa a região que deve ser preenchida.

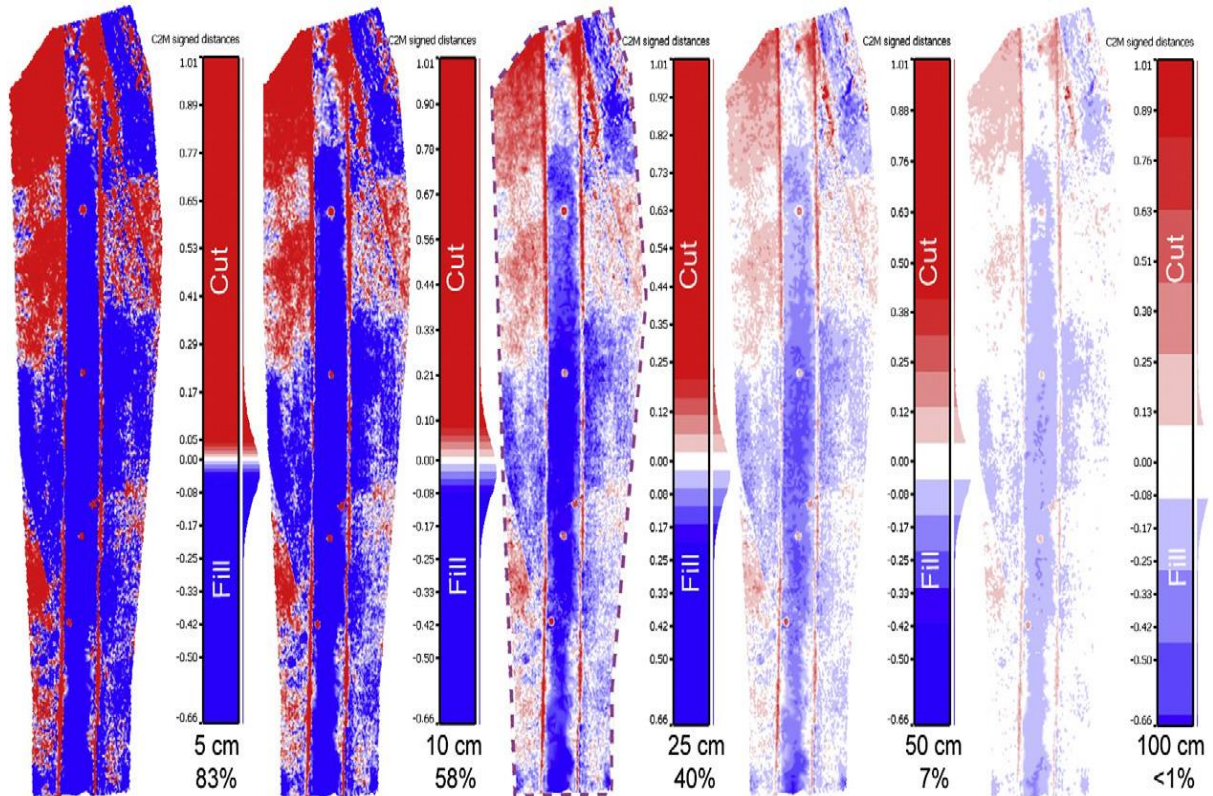


Figura 49 – Representação de Áreas a Serem Corrigidas Conforme Limite Estipulado
Fonte: Siebert; Teizer (2014).

Os resultados apresentados na Figura 49 mostram que para um limite de tolerância de até 5 centímetros 83% do trecho estudado deve ser revisado, ou seja, para um desvio máximo tolerável de 5 centímetros na cota do projeto 83% de toda a área de trabalho deve ser refeita. Seguindo a mesma linha de análise, para 10 centímetros de tolerância 58% da área deve ser revisada e para 100 centímetros de tolerância menos de 1% deveria ser revisado.

Para a deposição do material cortado, uma área com capacidade de armazenamento de 2 milhões de metros cúbicos foi escolhida, com dimensões: 570 metros de comprimento, 170 metros de largura e 25 metros altura. Para realizar o planejamento das atividades de corte e aterro outro MDE foi gerado. O produto gerado pelo processamento dos dados coletados pelo VANT passa por quatro estágios: a confecção da nuvem de pontos, a geração da malha da superfície, a criação da ortofoto (onde a imagem é reproduzida em uma escala única), e por último o MDE onde é possível analisar a condição de corte e aterro a ser realizado no terreno. Esses processos estão ilustrados na Figura 50.

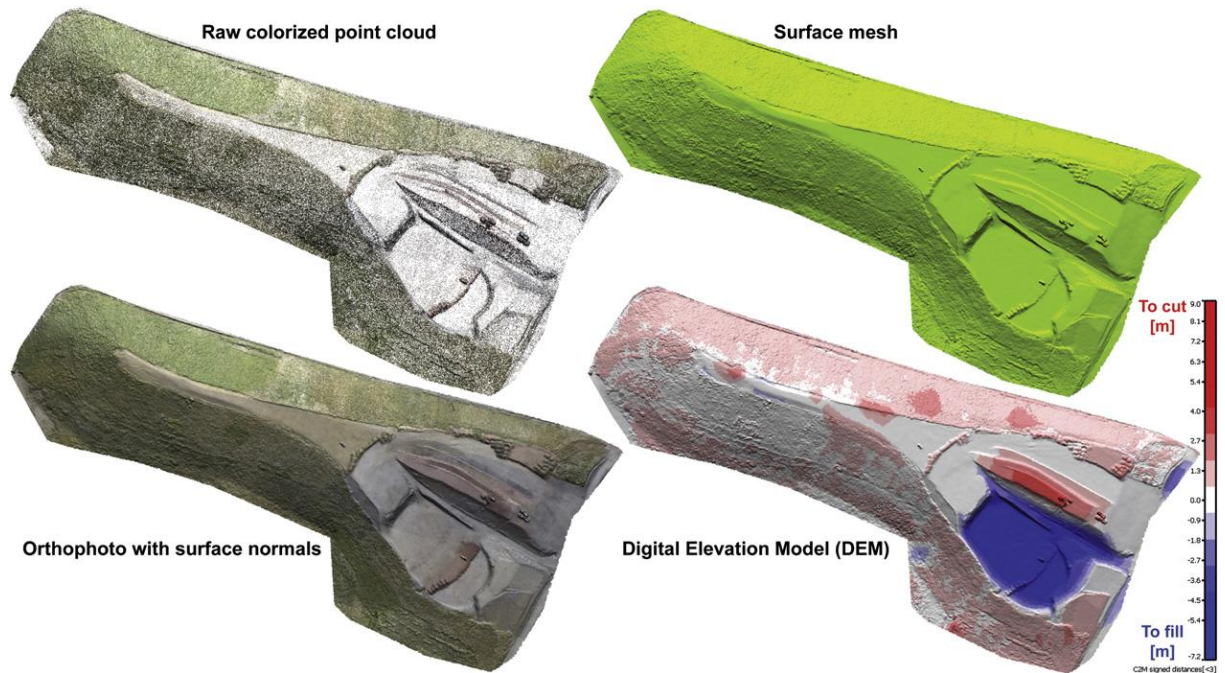


Figura 50 – Produtos Gerados pelo Processamento de Dados Aerofotogramétricos
 Fonte: Siebert; Teizer (2014).

Pelo MDE foi possível estimar a área a ser cortada e o volume de terra gerado pelo corte. Da mesma forma, a área a ser preenchida, assim como sua capacidade volumétrica de receber material também foi calculada, e os resultados estão apresentados na Figura 51, onde a cor azul representa a região a ser preenchida e a cor vermelha representa a região a ser cortada.

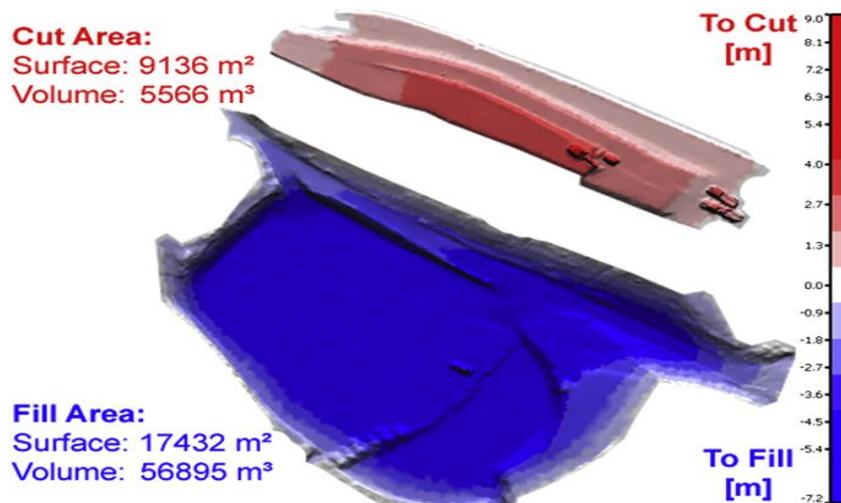


Figura 51 – Cálculo de Quantidade de Material a Ser Movido – MDE
 Fonte: Siebert; Teizer (2014).

Com esses dados conhecidos o gestor da obra pode se anteceder e planejar as atividades de escavação e preenchimento, estimando a quantidade necessária de máquinas para escavar o terreno, o número de caminhões para transporte de

material e quantificar o tempo necessário para concluir a atividade de terraplanagem do trecho em questão.

2.4.2 Caso Comparativo entre Topografia e Aerofotogrametria por VANT

O presente estudo de caso foi realizado pela parceria entre as Empresas DronEng e a EJECArt (Empresa Junior de Engenharia Cartográfica da Universidade Estadual Paulista, Sede de Presidente Prudente) (2016), e teve como objetivo analisar as diferenças entre os procedimentos e resultados do levantamento topográfico e aerofotogramétrico realizado por um VANT. O Estudo foi conduzido em uma área no município de Pirapozinho, no interior do Estado de São Paulo, e abrange uma área de 31.000 metros quadrados.

Para a aquisição dos dados topográficos as empresas utilizaram a Estação Total Topcon 105N, e para o processamento de cálculos foi utilizado o *software* TopoEVN 6. Para o planejamento da poligonal fechada, dois pontos de coordenadas conhecidas foram utilizados (P0 e P1), os quais também serviram de apoio para o referenciamento do mapeamento aéreo. Na Figura 52 está lustrada a poligonal utilizada no levantamento.



Figura 52 – Poligonal Fechada
Fonte: DronEng (2016).

A acurácia posicional final do levantamento topográfico foi de 5 milímetros no eixo X, 0,7 milímetros no eixo Y e 5 milímetros em Z.

Para o planejamento de voo do levantamento aerofotogramétrico dois receptores GNSS Trimble HiperSR L1/L2 foram utilizados para coletar 7 pontos de apoio e 3 pontos de verificação. O VANT utilizado foi o Batmap que é uma aeronave de asa fixa, específico para mapeamento aéreo, e é comercializado pela própria DronEng no valor de 61.000,00 Reais. O Batmap possui autonomia de 90 minutos, pesa 2,4 quilogramas, contempla uma câmera de 23,4 Megapixels com lentes de foco fixo, e possuiu sistema GNSS integrado para voos autônomos. A aeronave está ilustrada na Figura 53.



Figura 53 – Batmap
Fonte: DronEng (2016).

Os parâmetros de voo utilizados para o levantamento de dados foram os seguintes: altura de voo de 120 metros, GSD de 3 centímetros, sobreposição longitudinal e lateral de 80 e 50% respectivamente, 5 faixas foram sobrevoadas e um total de 136 imagens foram capturadas. O *software* utilizado para planejamento do voo foi o Mission Planner, e para processamento de dados o *software* utilizado foi o Pix4Dmapper.

A acurácia estimada para o levantamento com o Batmap foi de 3 a 4,5 centímetros no plano horizontal e de 6 a 9 centímetros no eixo vertical. Esses valores baseiam-se nos fatores multiplicadores do GSD, “a acurácia alcançada na planimetria (X,Y) é 1 a 1,5 vezes o tamanho do pixel, e na altimetria (Z) é de 2 a 3 vezes o tamanho do pixel” (DRONENG, 2016).

Para DronEng (2016), nos relatórios de cálculos o indicador de qualidade do produto final é a acurácia, que é representada pelo índice RMS, que é a sigla em inglês para (*Root Mean Square*), em português, é a raiz quadrada da média dos erros calculados para os pontos de verificação. As coordenadas desses pontos são coletadas com os receptores GNSS de alta precisão e são utilizadas como dados de entrada no *software* de processamento de dados do mapeamento aéreo. Após o processamento, o *software* exibe a discrepância entre as coordenadas de entrada com as coordenadas calculadas e gera um erro quadrático médio que representa a acurácia do projeto para cada eixo de referência.

O relatório com o cálculo dos erros encontrados para os três pontos de verificação está representado pelo Quadro 4.

Check Point Name	Error X[m]	Error Y[m]	Error Z[m]	Projection Error [pixel]
A3	-0.0069	0.0499	-0.0852	0.7451
A5	-0.0233	0.0644	-0.0344	0.6408
A7	0.0182	-0.0344	-0.1098	0.5538
Mean [m]	-0.004034	0.026634	-0.076470	
Sigma [m]	0.017061	0.043592	0.031390	
RMS Error [m]	0.017532	0.051084	0.082662	

Quadro 4 – Erros Apresentados nos Pontos de Verificação
Fonte: DronEng (2016).

Pelos dados apresentados no Quadro 4 nota-se que a acurácia alcançada no projeto foi de 1,7 centímetros no eixo X, 5,1 centímetros no eixo Y e 8,2 centímetros no eixo Z. Tais valores são satisfatórios quando comparados com a acurácia estimada para o projeto, pois representam erros inferiores ou próximos aos limites máximos esperados para cada eixo.

O MDS produzido pelo *software* Pix4Dmapper está representado na Figura 54 e ilustra a posição dos pontos de controle e de verificação ao longo da região estudada. A área de estudo para a comparação dos resultados do cálculo volumétrico está circulado pela elipse vermelha.

A diferença encontrada entre os resultados do cálculo volumétrico foi de 66 metros cúbicos, uma variação de 5,66% em relação ao volume calculado pelos dados da Estação Total. Essa variação é explicada pela malha de pontos gerada pela Estação Total ser menos densa do que a gerada pelo mapeamento aéreo, ou seja, o cálculo volumétrico baseado em uma nuvem de pontos mais densa apresenta

resultados mais acurados do que resultados que utilizam uma quantidade menor de pontos. Os resultados estão apresentados na Tabela 11.



Figura 54 – Modelo Digital de Superfície da Área Estudada
Fonte: Adaptado de DronEng (2016).

Tabela 11 – Cálculo de Volume pela Estação Total e pelo VANT

	Topografia	Aerofotogrametria	Diferença	Varição Relativa
Volume Calculado (m³)	1167,156	1233,23	66,074	5,66%
Área da Superfície (m²)	729,541	673,03	-56,511	-7,75%

Fonte: Adaptado de DronEng (2016).

Como resultado final para o estudo de caso, uma comparação entre o tempo necessário para a obtenção do produto final foi realizada, o número de profissionais envolvidos na atividade também foi considerado, assim como a qualidade das informações obtidas por cada processo (número de pontos coletados e acurácia dos resultados). Essa comparação está apresentada na Figura 55.

► COMPARATIVO | Desempenho



Figura 55 – Resumo Comparativo entre os Resultados
Fonte: Adaptado de DronEng (2016).

Como conclusão para os resultados apresentados pelo estudo de caso, nota-se que a topografia atinge resultados mais acurados que a aerofotogrametria, o que já era esperado, e por isso é recomendada para projetos de locação onde não é possível a utilização de VANTs, e em áreas menores com alto valor agregado. A aerofotogrametria, no entanto, apresenta melhor produtividade e melhor detalhamento do Terreno devido à quantidade superior de dados coletados. Por essa razão, a aerofotogrametria é recomendada para atividades que exigem uma rápida tomada de decisão, como por exemplo, para o cálculo de volumes e para a tomada de medidas em que a precisão seja na ordem de centímetros (DRONENG, 2016).

2.4.3 Avaliação de Resultados de MDS Gerado por Mapeamento Aéreo no Estacionamento da UTFPR-Curitiba Sede Ecoville

O presente estudo de caso tem suma importância para este trabalho de conclusão de curso, pois ambos os estudos compartilham da mesma área estudada para análise dos resultados. Por esse motivo, os resultados gerados por este artigo acadêmico serão comparados aos obtidos por este último estudo de caso. A análise

realizada no estacionamento da UTFPR-Curitiba sede Ecoville foi tema do trabalho de conclusão de curso do aluno de engenharia civil desta mesma universidade, Santos (2016).

Para este estudo de caso o VANT de utilização foi montado pelo próprio autor da pesquisa. Trata-se de um equipamento específico montado para a finalidade de mapeamento aéreo e usos em atividades de engenharia. A aeronave foi montada sobre um multirrotor hexacóptero, com a maioria de suas peças adquiridas da fabricante Mikrokopter. O sistema ótico utilizado foi uma câmera fotográfica Sony Nex 3 com 14,2 Megapixels com um conjunto ótico Sony SEL1855. A controladora de voo utilizada para o sistema de auto pilotagem foi a Ardupilotmega 2.5 em conjunto com um módulo GPS Mediatek MT3329. O custo estimado para a montagem do equipamento não foi mencionado pelo autor.

Para planejamento do voo o autor optou por utilizar o programa Mission Planner (mesmo programa utilizado no estudo de caso da DronEng). A altura de voo foi de 30 metros e o recobrimento de 80%. Para o processamento dos dados o programa de uso foi o PhotoScan (também utilizado por Siebert e Teizer (2014)).

Na área estudada, dois pontos tinham suas coordenadas georreferenciadas, e com a utilização de uma Estação Total quatro pontos foram irradiados e utilizados como pontos de controle para o mapeamento aéreo. Esses pontos estão dispostos conforme ilustrado na Figura 56.

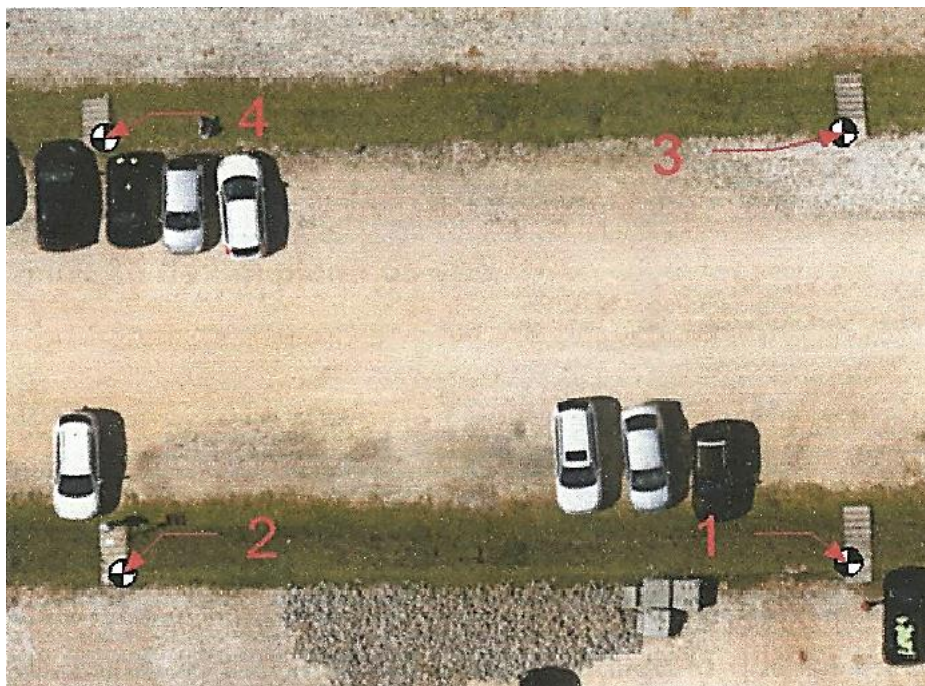


Figura 56 – Pontos de Controle
Fonte: Santos (2016).

Outros seis pontos (identificados pelas letras A a F) serviram de uso para aferição das medidas, mas não tiveram suas coordenadas calculadas. Com isso, o autor utilizou as medidas de quatro segmentos para a análise de erros dos resultados como ilustrado na Figura 57.

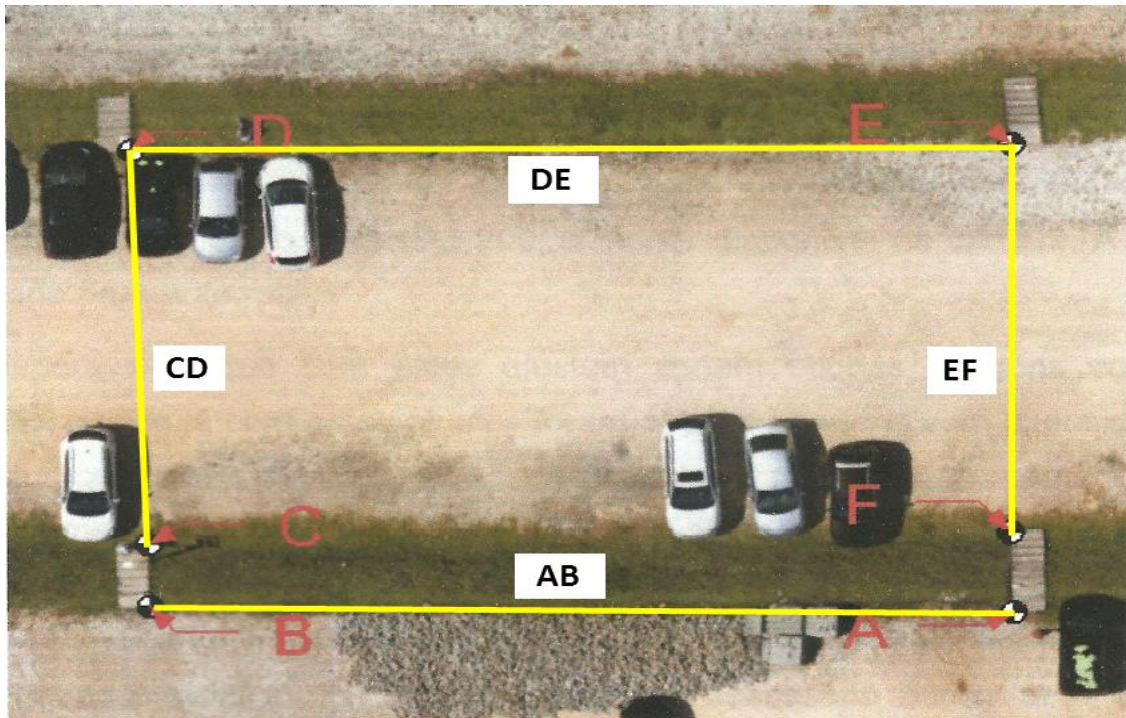


Figura 57 – Segmentos de Aferição de Medidas
Fonte: Adaptado de Santos (2016).

Dois Modelos Digitais de Elevação foram processados: o primeiro foi apoiado sobre os quatro pontos de controle, e o segundo não teve pontos de controle para referenciamento do modelo. Com esses dois modelos o erro médio e o desvio padrão do segundo modelo em relação ao primeiro foi calculado gerando os resultados apresentados no Quadro 5.

	Norte (m)	Oeste (m)	Cota (m)
Média	-6,73	3,38	13,65
Desvio	0,28	0,42	0,49

Quadro 5 – Erro Relativo Axial de Georreferenciamento
Fonte: Santos (2016).

Na Figura 58 está ilustrado o desvio dos resultados pela sobreposição de duas ortofotos geradas por ambos os modelos.



Figura 58 – Sobreposição das Ortofotos
Fonte: Santos (2016).

Para a verificação do erro das medidas dos segmentos ilustrados na Figura 57, primeiramente as medidas foram aferidas com uma trena e os resultados foram comparados com os gerados no PhotoScan em ambos os modelos. Os resultados estão expressos no Quadro 6.

Segmento	Trena (m)	Ortofoto georreferenciada via GPS no VANT (m)	Ortofoto georreferenciada via pontos de controle (m)
A - B	28,70	29,10	28.74
C - D	15,15	15,33	15.11
D - E	29,33	29,63	29.27
E - F	14,88	15,10	14.87

Quadro 6 – Comparação de Medidas dos Segmentos
Fonte: Santos (2016).

No Quadro 7 estão apresentados os erros absolutos e relativos calculados para cada segmento, comparando ambos os modelos com as medidas obtidas pela trena.

A média e o desvio padrão dos erros relativos calculados para cada segmento estão apresentados no Quadro 8.

Medidas	Ortofoto georreferenciada via GPS no VANT (m)		Ortofoto georreferenciada via pontos de controle (m)	
	Erro (m)	Erro relativo	Erro (m)	Erro relativo
A - B	0.40	1.408%	0.04	0.139%
C - D	0.18	1.208%	-0.03	-0.251%
D - E	0.30	1.030%	-0.05	-0.194%
E - F	0.22	1.485%	-0.00	-0.060%

Quadro 7 – Comparativo entre Erros
Fonte: Adaptado de Santos (2016).

	Ortofoto georreferenciada via pontos de controle	Ortofoto georreferenciada via GPS no VANT
Média	-0.09%	1.28%
Desvio padrão	0.15%	0.18%

Quadro 8 – Média dos Erros de Cada Modelo
Fonte: Adaptado de Santos (2016).

Pela análise comparativa dos resultados, o georreferenciamento do modelo utilizando o receptor GPS do VANT teve uma considerável discrepância quando comparado ao modelo apoiado nos quatro pontos de controle. O desvio médio encontrado nas coordenadas no eixo Z foi de 13,65 metros, nos eixos X e Y os desvios encontrados foram de -6,73 e 3,38 metros respectivamente. Tais valores demonstram que o receptor GPS acoplado no VANT não possui precisão adequada para atividades de georreferenciamento por si só.

Analisando os erros obtidos na aferição das medidas dos segmentos, o modelo apoiado nos pontos de controle apresentou resultados bastante acurados quando comparados às medidas obtidas pela trena. O maior erro encontrado deste modelo foi de 5 centímetros no segmento DE, tendo como média dos erros relativos o valor de 0,09% e desvio padrão de 0,15%, valores considerados satisfatórios para atividades de georreferenciamento. No entanto, os erros obtidos no modelo que não foi apoiado pelos pontos controle tiveram maiores proporções, chegando a 40 centímetros no segmento AB. Em média o erro absoluto encontrado foi de 27,5 centímetros, e o erro médio relativo em relação às medidas aferidas pela trena foi aproximadamente 1,3%.

A análise do estudo de caso elaborado por Santos (2016) leva a concluir que o SANT (Sistema Aéreo Não Tripulado), assim como a metodologia de aquisição de dados empregados pelo autor, podem ser utilizados como ferramentas para a aquisição de dados para mapeamento aéreo, desde que sejam conhecidas as necessidades e a precisão requerida pelo projeto.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 EQUIPAMENTOS E SOFTWARES UTILIZADOS

3.1.1 VANT DJI Phantom 3 *Advanced*

Existem vários VANTs fabricados especificadamente para atividades de mapeamento aéreo que apresentam alta tecnologia embarcada e podem custar mais de 60 mil reais, como mencionado na seção anterior. Sabe-se que essas aeronaves conseguem resultados bastante satisfatórios, como apresentado nos estudos de caso neste trabalho. Algumas apresentam receptores GPS-RTK integrado em sua estrutura, são produzidas em fibra de carbono ou alumínio leve, apresentam câmeras digitais de alta resolução com lentes sofisticadas, e o conjunto desses equipamentos permite a aquisição de dados acurados. De contra partida, para este trabalho, com o intuito de analisar os resultados, optou-se por utilizar o VANT Phantom 3 *Advanced* produzido pela empresa chinesa DJI que o classifica como equipamento para atividades de entretenimento. Seu custo de 799,00 dólares é considerado relativamente baixo quando comparados aos VANTs desenvolvidos para uso profissional que ultrapassam dezenas de milhares de dólares. Acredita-se que essas mini aeronaves de uso recreativo já possuem tecnologias suficiente para atingir bons resultados para atividades no campo da engenharia e da agricultura, antes somente obtidos por equipamentos profissionais.

O Phantom 3 *Advanced* foi escolhido devido à sua praticidade na pilotagem, e por sua compatibilização com a maioria dos *softwares* de planejamento de voo. Esse modelo vem com controle para pilotagem, câmera de 2,7K, e controladora de voo de fábrica (para pilotagem automática). Para que o modo piloto automático funcione o equipamento deve estar em modo de operação “S”.

Na Tabela 12 é possível verificar algumas especificações técnicas segundo o fabricante, e o equipamento está ilustrado na Figura 59.

PHANTOM 3 ADVANCED



Figura 59 – Phantom 3 *Advanced*
Fonte: DJI (2016).

Tabela 12 – Especificações Técnicas Phantom 3 *Advanced*

Aeronave	
Peso (bateria inclusa)	1280g
Velocidade ascendente máxima	5m/s
Velocidade descendente máxima	3 m/s
Velocidade máxima	16 m/s (no modo ATTI, sem vento)
Altitude de voo máxima	6000 m
Tempo de voo máxima	Aproximadamente 23 minutos
Intervalo de temperatura para operação	0°C a 40°C
Modo GPS	GPS/GLONASS
Câmera	
Sensor	Sony EXMOR 1/2.3" Pixels Efetivos: 12.4M (pixels totais: 12.76M)
Tamanho máximo da imagem	4000x3000
Intervalo de ISO	100-3200 (vídeo) 100-1600 (foto)
Lentes	FOV 94° 20mm (equivalente a formato 35mm) f/2.8
Modo de fotografia fixa	Disparo único Disparos múltiplos: 3/5/7 quadros Auto exposição (AEB): 3/5 quadros com viés de 0.7EV Time-lapse
Modos de gravação de vídeo	UHD (4k): 4096x2160p24/25; 3840x2160p24/25/30 FHD: 1920x1080p24/25/30/48/50/60 HD: 1280x720p24/25/30/48/50/60
Bitrate máximo de armazenamento de vídeo	60Mbps
Formatos de arquivo suportados	FAT32/exFAT; Foto: JPEG, DNG; Vídeo: MP4/ MOV (MPEG-4 AVC/H264)
Tipos de cartão SD suportados	Micro SD; Capacidade máxima: 64GB. Classe 10 ou classificação UHS-1 necessária.
Intervalo de temperatura para operação	0°C a 40°C

Fonte: DJI (2016).

3.1.2 Estação Total Leica TS06 Plus

A Estação Total foi utilizada para irradiar as coordenadas dos pontos conhecidos obtidos por GPS de alta precisão, para o cálculo das coordenadas dos pontos de controle utilizados no mapeamento no estacionamento da UTFPR-Curitiba, Sede Ecoville. O equipamento foi fornecido pelo DACOC (Departamento Acadêmico de Construção Civil) desta mesma universidade. As especificações técnicas e a foto da estação total estão apresentadas na Tabela 13 e na Figura 60, respectivamente.

Tabela 13 – Especificações Técnicas Leica TS06 Plus

ANGLE MEASUREMENT (HZ, V)		TELESCOPE	
Accuracy ¹⁾	1" (0.3 mgon) / 2" (0.6 mgon) 3" (1 mgon) / 5" (1.5 mgon) 7" (2 mgon)	Magnification	30 x ✓
Method	Absolute, continuous, diametrical: at all models ✓	Resolving power	3" ✓
Display resolution	0.1" / 0.1 mgon / 0.01 mil ✓	Field of View	1° 30' (1.66 gon) 2.7 m at 100 m ✓
Compensation	Quadruple axis compensation: at all models ✓	Focusing range	1.7 m to infinity ✓
Compensator setting accuracy	0.5" / 0.5" / 1" / 1.5" / 2" ✓	Reticle	Illuminated, 10 brightness levels ✓
Compensator range	0.07 gon ✓	KEYBOARD AND DISPLAY	
Endless drives	Smooth movements with no delayed response time ✓	Keyboard and display	Full Alpha-numerical keyboard with high resolution, Black & white display, Graphics, 160 x 288 pixels, Display illuminated, 5 brightness levels ✓
DISTANCE MEASUREMENT WITH REFLECTOR		Position	Face I, Face II ✓○
Range ²⁾ Round prism (Leica GPR1)	3,500 m ✓	OPERATING SYSTEM	
Range ²⁾ Reflective tape (60 mm x 60 mm)	>500 m ⁴⁾ >1000 m ¹⁰⁾ ✓	Windows CE	5.0 Core ✓
Range ²⁾ Prism-Long (Leica GPR1, R500/R1000)	>10,000 m ✓	LASERPLUMMET	
Accuracy ³⁾	Precise+: 1.5 mm + 2.0 ppm Precise Fast: 2.0 mm + 2.0 ppm Tracking: 3.0 mm + 2.0 ppm ✓	Type	Laser point, 5 brightness levels ✓
Typical measurement time ⁴⁾	1.0 s ✓	Centring accuracy	1.5 mm at 1.5 m instrument height ✓
Measurement time while in "Precise+" mode:	2.4 s ✓	BATTERY	
DISTANCE MEASUREMENT WITHOUT REFLECTOR ⁸⁾		Type	Lithium-Ion ✓
Range ⁵⁾ PinPoint R500 / R1000	> 500 m / > 1000 m ✓○	Operating time ⁷⁾	Approx. 30 hours ✓
Accuracy ³⁾⁴⁾	2 mm + 2 ppm ✓	Battery charging time	2.3 hours ✓
Laser dot size	At 30 m: approx. 7 x 10 mm At 50 m: approx. 8 x 20 mm ✓	WEIGHT	
DATA STORAGE / COMMUNICATION		Total station including GEB211 and tribrach	5.1 kg ✓
Internal memory	Max.: 100,000 fixpoints, Max.: 60,000 measurements ✓	ENVIRONMENTAL	
Interfaces	- Serial (Baudrate up to 115'200) - USB Type A and mini B, - Bluetooth® Wireless, class 1, 150 m - TCPS29 (non-EU) > 1000 m - TCPS30 (EU) > 500 m ✓	Temperature range (operation)	-20° C to +50° C (-4° F to +122° F) ✓ Arctic Version -35° C to 50° C (-31° F to +122° F) ○
Data formats	CSI / DXF / LandXML / CSV / user definable ASCII formats ✓	Dust / Water (IEC 60529) Humidity	IP55, 95%, non condensing ✓
GUIDE LIGHT (EGL)		LEICA FLEXFIELD PLUS ONBOARD SOFTWARE	
Working Range (average atmospheric conditions)	5 m - 150 m ○	Included Application Programs: Survey incl. Map View; Stake Out; Station Setup including: Resection, Local Resection, Helmert Resection, Orientation (Angles & Coordinates), Height Transfer; Area (Plan & Surface); DTM Volume calculation; Tie Distance (MLM); Remote Height; Hidden Point; Backsight Check; Offset; Reference Line; Reference Arc; Reference Plane; Road 2D; COGO ✓	
Positioning accuracy	5 cm at 100 m ○	Extra Application Programs: Road 3D, Tunnel, Traverse ○	
		THEFT PROTECTION	
		mySecurity, PIN/PUK Code ✓✓	

Fonte: Leica (2016).



Figura 60 – Leica TS06 Plus
Fonte: Leica (2016).

3.1.3 Programa para Pilotagem Assistida e Planejamento de Voo

Para o planejamento do voo optou-se utilizar o programa Pix4Dcapture, pois este *software* disponibiliza funções pré-programadas para os VANTs da empresa chinesa DJI, e devido à compatibilização com o programa de processamento de dados que também é produzido pela Pix4D. Essa funcionalidade facilita vários fatores na hora do processamento dos dados, como por exemplo: evita a necessidade de calibrar as distorções das fotos capturadas pelo VANT, pois esse procedimento é executado automaticamente pelos parâmetros pré-configurados da câmera no *software*.

O Pix4Dcapture pode ser utilizado em qualquer dispositivo que utilize a plataforma Android ou IOS que tenha antena WI-FI. Recomenda-se ter acesso à internet durante a execução do voo. O dispositivo utilizado na execução do voo foi um Iphone 5S com 32 Gigabytes de memória e conexão à internet 3G.

3.1.4 Programa para Processamento de Dados

Optou-se por utilizar o *software* Pix4Dmapper versão Profissional para o processamento dos dados. A empresa fornece uma licença gratuita por 15 dias desta versão, mas essa pode ser alugada pelo valor de 350 dólares mensais.

3.1.5 Computador para Processamento

O computador utilizado para processamento dos dados foi um *Laptop* Sony VAIO Flip14 com as seguintes especificações apresentadas no Quadro 9:

Processor		Graphics	
Processor Type	Intel® Core™ i5-4200U	Graphics Processor	Intel® HD Graphics 4400
Processor Technology	Dual Core	Graphics Video RAM	Internal
Processor Speed	1.60GHz ¹ with Intel® Turbo Boost Technology up to 2.60GHz ²	Maximum Resolution HDMI	1920 x 1080
Processor Cache	3MB	Storage	
Display		Storage Type	Serial ATA
Screen Size	14.0"	Storage Capacity	500GB ⁴
Resolution	1920 x 1080	Storage Technology	5400rpm
Touch Technology	Capacitive Touchscreen, Digitizer Support	Hardware	
Display Technology	Full HD, Triluminos Display for Mobile	Camera	HD Web Camera powered by Exmor R® for PC and microphone
Backlight Technology	LED	Keyboard	QWERTY, 82 keys with 1.2mm stroke and 19mm pitch
Memory		Backlit Keyboard	Yes
Installed Memory	8GB (8GB x 1)		
Memory Type/Speed	DDR3L / 1600MHz		
Max. Memory	Fixed		

Quadro 9 – Especificações Técnicas do Laptop
Fonte: Sony (2016).

Cada modelo levou por volta de 45 minutos para o processamento inicial para gerar a nuvem de pontos. Duas horas a mais foram necessárias para a geração do MDS, MDT e da ortofoto.

3.2 LOCAL DE ESTUDO

A área escolhida para a análise dos resultados foi o estacionamento da UTFPR-Curitiba sede Ecoville, localizada no bairro Campo Comprido, na cidade de Curitiba – PR. Optou-se por essa área devido à facilidade de acesso aos autores em qualquer dia da semana, e também por já haver um estudo realizado com VANTs na mesma região, pois isso facilita a análise comparativa entre os resultados. A execução do voo foi realizada no feriado do servidor público no dia 28 de outubro de 2016. Essa data foi escolhida, pois poucos carros estariam estacionados no local, permitindo a facilidade de circulação e aquisição de dados com a estação total e com o VANT. Além disso, poucas pessoas estariam circulando no estacionamento da universidade e isso reduziria a probabilidade de acontecer algum acidente caso o VANT apresentasse alguma falha mecânica. Na Figura 61 está ilustrada a posição geográfica do local de estudo, enquanto que na Figura 62 está ilustrado o terreno propriamente dito.

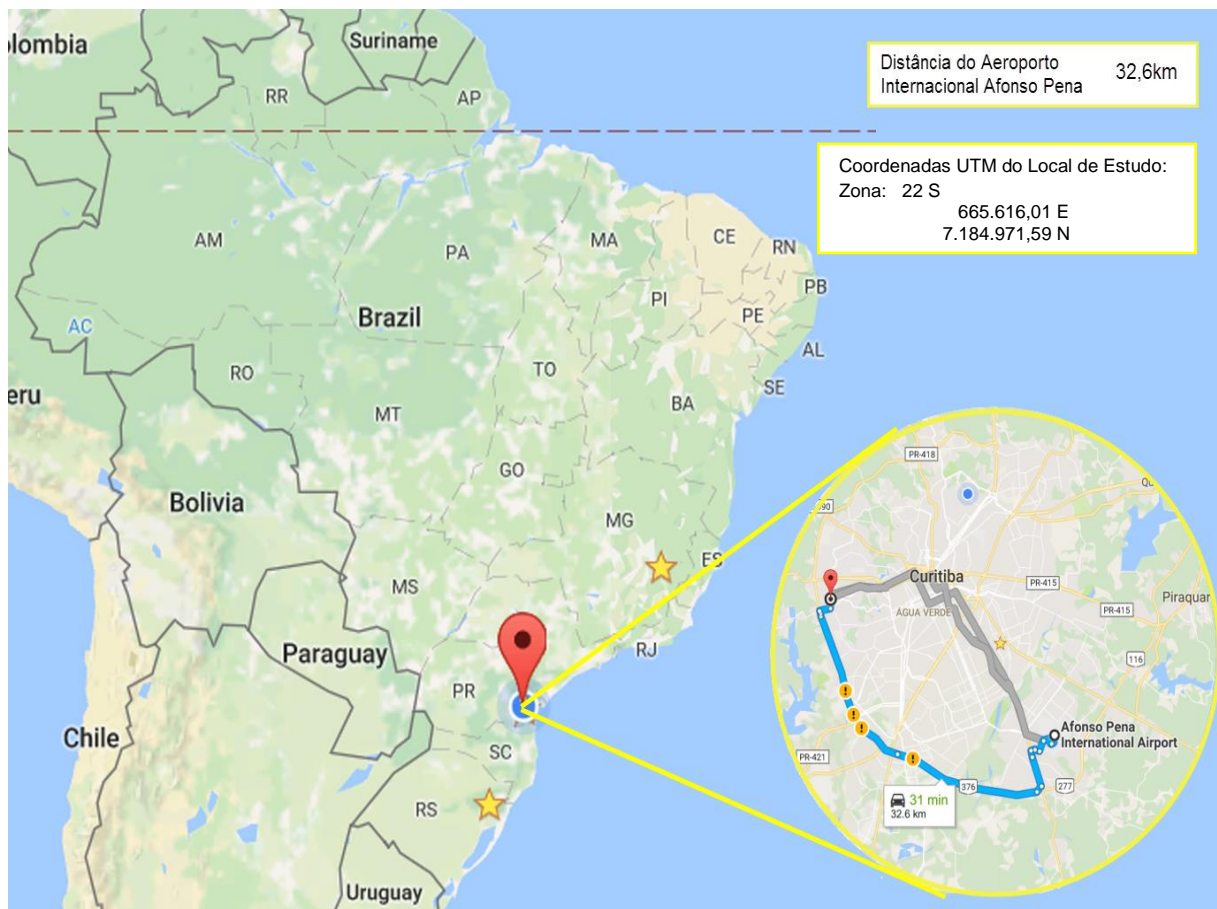


Figura 61 – Localização Regional do Local de Estudo
Fonte: Os Autores (2016).



Figura 62 – Local de Estudo
Fonte: Os Autores (2016).

3.3 AQUISIÇÃO DE DADOS COM A ESTAÇÃO TOTAL

Alguns pontos foram coletados no terreno para servirem de apoio no mapeamento como pontos de controle ou de verificação. Inicialmente, dois pontos tinham suas coordenadas georreferenciadas, por conseguinte, a estação total foi posicionada em um desses pontos, visando o prisma posicionado no outro ponto de coordenada conhecida, denominado “Ré”. Então, a estação total foi zerada e o processo de irradiação para coleta dos ângulos e da distância horizontal entre os pontos de interesse foi iniciado. Conforme ilustrado na Figura 63, foram coletados 13 pontos no terreno, reconhecíveis na imagem aérea, que serviram para georreferenciar o modelo gerado e verificar os erros do posicionamento no processamento do programa Pix4Dmapper. O valores das coordenadas dos Pontos de interesse não foram obtidos diretamente da estação total, por questões didáticas optou-se por calcular as coordenadas de cada ponto através dos azimutes obtidos.

Os resultados obtidos pelo levantamento da estação total estão apresentados na Tabela 14.

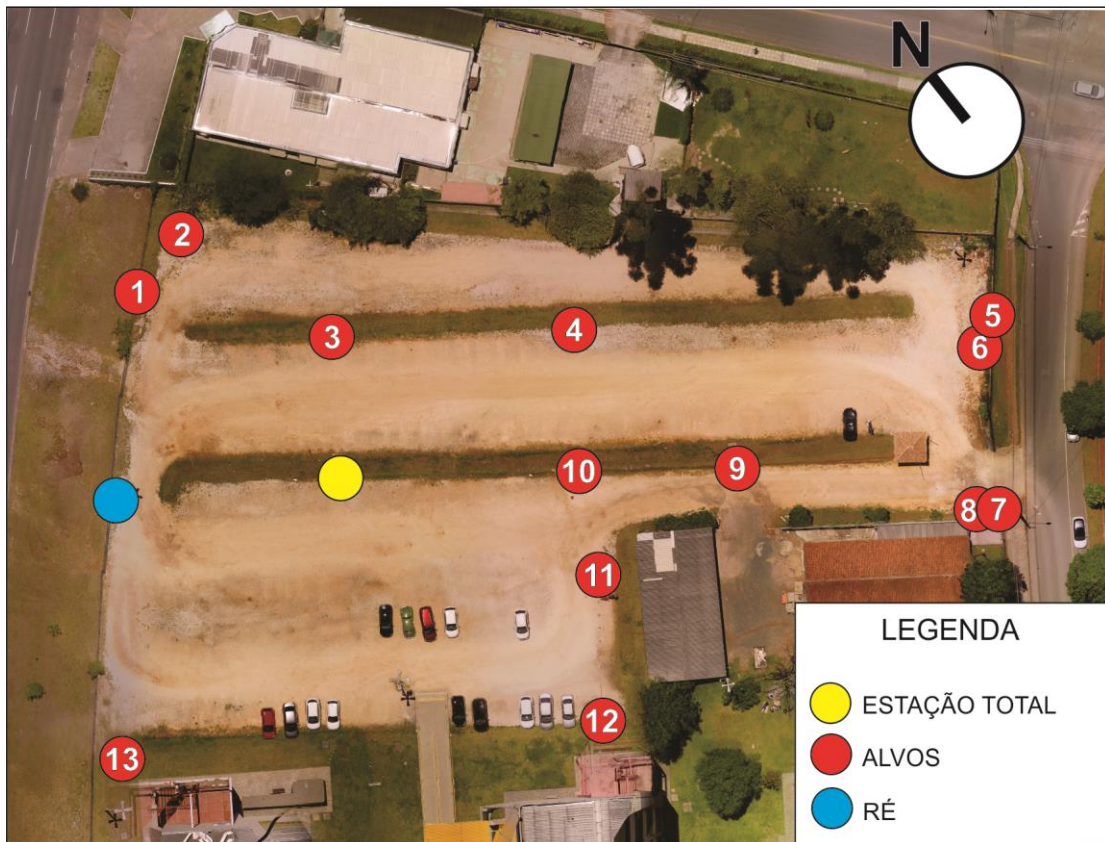


Figura 63 – Pontos de Interesse para Georreferenciamento
Fonte: Os Autores (2016).

Tabela 14 – Dados Coletados pela Estação Total

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Ângulo Horizontal (° ; ' ; ")	46:49:53	61:48:32	93:17:38	157:34:41	172:26:54	176:37:25	190:46:38
Ângulo Vertical (° ; ' ; ")	91:03:57	90:39:07	88:36:55	88:09:44	88:37:27	88:21:14	87:14:14
Distância Horizontal (m)	32,793	34,407	15,529	33,736	83,865	81,154	82,45
	P8	P9	P10	P11	P12	P13	
Ângulo Horizontal (° ; ' ; ")	190:51:12	187:08:16	188:45:25	210:11:18	231:02:40	313:14:13	
Ângulo Vertical (° ; ' ; ")	87:12:26	86:51:38	85:47:12	86:10:59	87:05:32	88:08:08	
Distância Horizontal (m)	79,633	49,622	29,882	35,013	45,788	45,479	

Fonte: Os Autores (2016).

Com os ângulos e as distâncias horizontais conhecidos foram calculados os azimutes e as coordenadas georreferenciadas em UTM (Universal Transversa de Mercator) para o Fuso 22-Sul de cada ponto. Os ângulos verticais foram utilizados para o cálculo da cota de cada ponto. Os resultados estão expressos na Tabela 15.

Tabela 15 – Coordenadas Georreferenciadas em UTM dos Pontos de Interesse

	ET	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Azimute (° ; ' ; ")	301:48:21	348:38:14	3:36:53	35:05:59	99:23:02	114:15:15	118:25:46
Coordenada (E) (m)	666.555,30	665.548,84	665.557,47	665.564,23	665.588,58	665.631,76	665.626,66
Coordenada (N) (m)	7.185.027,38	7.185.059,53	7.185.061,72	7.185.040,09	7.185.021,88	7.184.992,93	7.184.988,75
Cota (m)	953,11	951,85	952,07	952,84	952,68	954,47	954,79
	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
Azimute (° ; ' ; ")	132:34:59	132:39:33	128:56:37	130:33:46	151:59:39	172:51:01	255:02:34
Coordenada (E) (m)	665.616,01	665.613,86	665.593,92	665.578,00	665.571,74	665.561,00	665.511,36
Coordenada (N) (m)	7.184.971,59	7.184.973,42	7.184.966,17	7.185.007,95	7.184.966,47	7.184.981,95	7.185.015,64
Cota (m)	956,44	956,34	955,18	954,66	954,80	954,79	953,94

Fonte: Os Autores (2016).

3.4 PLANEJAMENTO DE VOO

3.4.1 Segurança

Por questões de segurança durante a execução do voo algumas recomendações sugeridas pela ANAC (2015) e pela DJI (2016) foram seguidas e estão listadas a seguir:

- Voar apenas em condições climáticas favoráveis, preferencialmente sob a luz solar sem possibilidade de chuvas;
- Não sobrevoar quando a velocidade do vento for superior a 10 metros por segundo;
- Sempre calibrar a bússola do VANT antes do primeiro voo ou quando houver mudança de locais internos para externos;
- Certificar se as baterias do controle remoto e do VANT estão totalmente carregadas antes do voo;
- Voar em altitudes inferiores a 120 metros;
- Não realizar voos dentro de um raio de 5,5 quilômetros de aeroportos;
- Manter sempre o VANT na linha de visão;

- Manter o controle remoto ligado e conectado ao VANT para eventual intervenção se necessário;
- Manter uma distância de 30 metros de pessoas e de prédios.

3.4.2 Parâmetros de Voo

É necessário entrar com alguns parâmetros iniciais de voo no programa Pix4Dcapture, conforme as necessidades e limitações do projeto. Os parâmetros determinados para o planejamento de voo estão listados a seguir.

3.4.2.1 Altura de voo

A altura de voo escolhida foi de 40 metros sobre o ponto de decolagem. Optou-se por esse valor, pois na divisa leste do terreno há alguns pinheiros altos que poderiam representar algum risco de colisão para a aeronave. Outro fato importante para a escolha dessa altura é a possibilidade das imagens ficarem distorcidas em alturas inferiores devido ao efeito de arrastamento.

Quando a altura do voo e os parâmetros da câmera são estabelecidos, o programa calcula automaticamente o GSD utilizado no projeto, o qual foi calculado em 1,67 centímetros.

3.4.2.2 Área de voo

A área de voo é a região pela qual o Phantom irá realizar o mapeamento, e por onde passam as linhas de voo. Conforme ilustrado na Figura 64, um total de 7 faixas de captura de imagens foram sobrevoadas, dentro de uma área de 11160 m². A quantidade necessária de faixas é calculada automaticamente pelo programa conforme a altura e o tamanho da área sobrevoada.



Figura 64 – Plano de Voo
Fonte: Os Autores (2016).

3.4.2.3 Área de cobertura

A área de cobertura é a área total capturada pela câmera do VANT gerada pelo mosaico de imagens. Um total de 70 fotos foram coletadas, gerando uma área projetada de 22300 m². O tempo necessário para o término do processo foi de 4 minutos e 49 segundos. Na Figura 65 estão ilustrados os pontos de captura de cada foto na região de interesse.

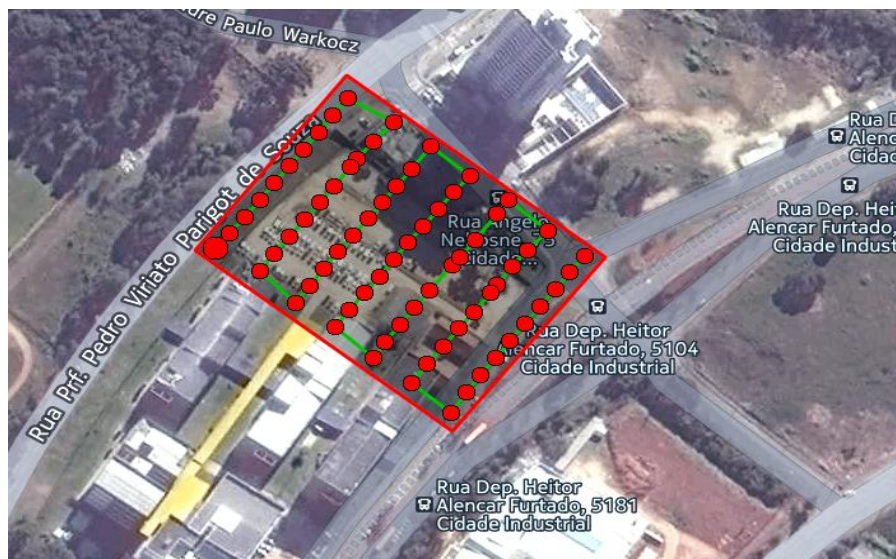


Figura 65 – Pontos de Captura de Imagem
Fonte: Os Autores (2016).

3.4.2.4 Velocidade do voo

No Pix4Dcapture o Phantom pode ser operado em dois modos de voo: o *safe mode* e o *fast mode*. Esses modos se diferenciam pela maneira com que o VANT faz a tomada das fotos; no primeiro a aeronave realiza pausas no momento da aquisição das imagens, ou seja, em cada ponto vermelho representado na Figura 65 o equipamento realiza uma parada total, anota as coordenadas em formato Exif e captura uma Imagem em formato JPEG. Já no *fast mode* o processo é contínuo, a aeronave opera em sua velocidade máxima de voo (16 metros por segundo), não havendo pausas durante o processo de aquisição de dados. Acredita-se que essa diferença possa influenciar na qualidade de detalhamento do MDS gerado, pois quando a imagem é capturada em movimento, há a possibilidade desta apresentar borrões conforme o tempo de abertura da lente que foi programado na câmera. Por outro lado, o voo quando executado no *safe mode* reduz a produtividade do levantamento pela metade do outro modo. A análise comparativa entre os dois modos de voo não será realizada neste trabalho, pois foge do objetivo principal proposto.

3.4.2.5 Recobrimento longitudinal e lateral de imagens

Conforme recomendação de Santos (2007) e da análise dos estudos de caso apresentados neste trabalho, optou-se por utilizar o recobrimento longitudinal de 80%. O recobrimento lateral, para o programa Pix4Dcapture, é calculado como a distância lateral entre duas imagens seja duas vezes a distância longitudinal entre elas, levando a um resultado próximo ao recobrimento longitudinal (PIX4D⁴, 2016). Na Figura 66 estão ilustrados todos os parâmetros configurados antes da decolagem da mini aeronave.

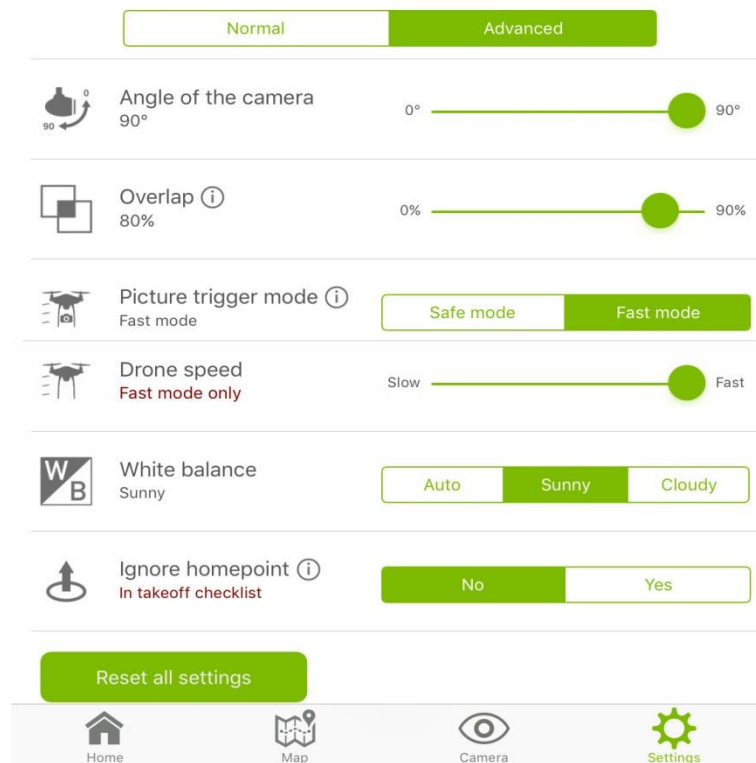


Figura 66 – Resumo dos Parâmetros do Planejamento de Voo
Fonte: Os Autores (2016).

3.5 PROCESSAMENTO DE DADOS

Após a execução do voo, os dados foram transferidos para o *software* Pix4Dmapper. Os pontos de interesse georreferenciados foram escritos em um arquivo ‘txt’, o qual foi carregado no programa. Com as coordenadas dos pontos de interesse carregadas no programa, seleciona-se quais pontos servirão para georreferenciar e quais servirão para a verificação da acurácia do modelo. Em seguida, o *software* gera a nuvem de pontos que é a base para a criação do MDS e da ortofoto. Outro resultado possível é a ortofotocarta, que é a ortofoto representada com as curvas de nível do terreno, esse resultado, no entanto, não é gerado automaticamente pelo Pix4Dmapper, necessitando, portanto, da intervenção do usuário no programa. Na Figura 67 um resumo é apresentado do passo-a-passo do procedimento completo de aquisição e processamento de dados em um fluxograma para facilitar o entendimento do processo.

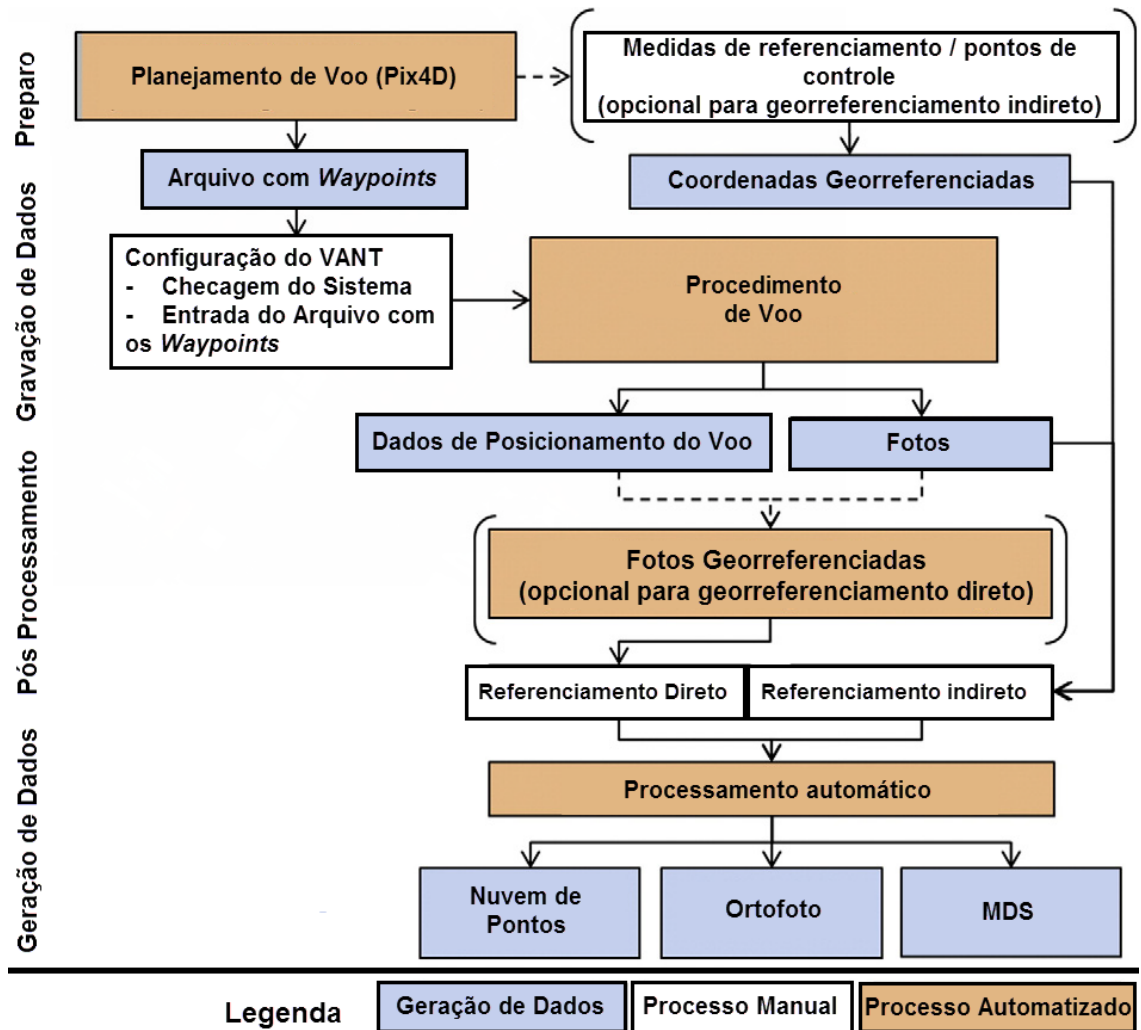


Figura 67 – Fluxograma do Processo de Mapeamento
 Fonte: Adaptado de Siebert; Teizer (2014).

Com a ortofoto e o MDS gerados é possível avaliar os resultados, comparando as distâncias entre os pontos de verificação dos modelos com as distâncias reais absolutas obtidas pela estação total, ou seja, assume-se que os pontos de verificação georreferenciados pela estação total não apresentam erros. Partindo desse pressuposto, pode-se verificar o erro obtido pelo levantamento aéreo e determinar a acurácia para cada caso.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 GEORREFERENCIAMENTO DO MODELO

4.1.1 Acurácia Absoluta do Modelo Georreferenciado pelo GPS do VANT

Para realizar uma análise comparativa da acurácia absoluta, cuja definição é a diferença entre a posição geográfica do modelo e a sua posição real na Terra (PIX4D¹, 2016), foram comparados os resultados dos erros de 14 pontos de verificação no modelo gerado sem pontos de controle, ou seja, o georreferenciamento do modelo baseia-se somente nos dados do GPS do Phantom. O parâmetro de comparação que representa a acurácia do projeto é representado pelo RMS calculado e os resultados estão apresentados no Quadro 10.

Check Point Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
ponto 1	0.020/0.020	0.033	0.551	16.740	0.803	17 / 17
ponto 2	0.020/0.020	0.366	0.822	16.759	2.554	14 / 14
ponto 3	0.020/0.020	0.228	0.727	16.819	0.922	15 / 15
ponto 4	0.020/0.020	0.168	0.561	16.701	1.024	19 / 20
ponto 5	0.020/0.020	0.254	0.212	15.684	2.118	14 / 14
ponto 6	0.020/0.020	0.332	-0.302	16.364	1.209	15 / 16
ponto 7	0.020/0.020	0.328	-0.291	16.236	1.681	14 / 14
ponto 8	0.020/0.020	0.172	-0.359	16.244	3.735	8 / 8
ponto 9	0.020/0.020	0.191	-0.299	16.236	0.870	11 / 11
ponto 10	0.020/0.020	0.152	0.018	16.437	0.595	15 / 15
ponto 11	0.020/0.020	0.098	0.245	16.536	0.777	15 / 15
ponto 12	0.020/0.020	-0.020	0.173	15.868	2.151	14 / 14
ponto 13	0.020/0.020	-0.104	0.191	15.898	1.961	11 / 11
ponto 14	0.020/0.020	-0.335	0.836	16.847	1.046	6 / 7
Mean [m]		0.133145	0.220354	16.383505		
Sigma [m]		0.183522	0.414734	0.363908		
RMS Error [m]		0.226733	0.469638	16.387546		

Quadro 10 – Pontos de Verificação e Acurácia Absoluta do Modelo

Fonte: Os Autores (2016).

Assumindo que a dispersão dos erros para os modelos gerados seguem uma distribuição Gaussiana, para um intervalo de confiança de $\pm \sigma$, os resultados obtidos pelo Quadro 10 mostram que, para 68,2% de probabilidade, a acurácia do modelo georreferenciado pelo GPS do Phantom 3 *Advanced* foi de $13,31 \pm 22,67$











centímetros para o eixo X, $22,03 \pm 46,96$ centímetros para o eixo Y, e $16,38 \pm 16,38$ metros para o eixo Z, onde o valor absoluto representa a média dos erros no eixo em questão, e o intervalo representa o RMS obtido em cada eixo.

Conforme descrito pela norma do INCRA referenciada pela Tabela 3 neste trabalho, para o georreferenciamento de imóveis rurais seguindo a classe P3, a precisão necessária para o levantamento planimétrico é de ± 50 centímetros. Calculando as médias dos erros e dos RMS's obtidos no Quadro 10 para o plano (X Y), a acurácia calculada é de $25,73 \pm 52,15$ centímetros. Esse resultado inibe a utilização do sistema montado neste trabalho sem o apoio de pontos de controle para fins de cadastramento rural, pois o valor máximo do erro encontrado extrapola o limite imposto pela norma em 2,15 centímetros ($52,15 - 50$).

4.1.2 Acurácia Absoluta do Modelo Georreferenciado por Pontos de Controle

Para essa análise foram executadas diferentes configurações para o georreferenciamento indireto do modelo. Nove configurações foram avaliadas, variando de 2 a 10 pontos de controle utilizados.

Os resultados obtidos utilizando cinco ou mais pontos de controle apresentaram erros médios (RMS) superiores a quatro vezes o GSD (1,67 centímetros), ou seja, a média dos resultados dos RMS de cada eixo (X,Y e Z) é quatro vezes maior que o valor do GSD do projeto. Tal verificação gera um aviso no relatório de qualidade inviabilizando a utilização dessas configurações, como apresentado no Quadro 11.

Georeferencing	yes, no 3D GCP	
Georeferencing	yes, 2 GCPs (2 3D), mean RMS error = 0.01 m	
Georeferencing	yes, 3 GCPs (3 3D), mean RMS error = 0.016 m	
Georeferencing	yes, 4 GCPs (4 3D), mean RMS error = 0.03 m	
Georeferencing	yes, 5 GCPs (5 3D), mean RMS error = 0.085 m	
Georeferencing	yes, 6 GCPs (6 3D), mean RMS error = 0.085 m	
Georeferencing	yes, 7 GCPs (7 3D), mean RMS error = 0.084 m	
Georeferencing	yes, 8 GCPs (8 3D), mean RMS error = 0.099 m	
Georeferencing	yes, 9 GCPs (9 3D), mean RMS error = 0.1 m	
Georeferencing	yes, 10 GCPs (10 3D), mean RMS error = 0.101 m	

Quadro 11 – Diferentes Pontos de Controle para o Georreferenciamento.
Fonte: Os Autores (2016).

Determinar a quantidade e o posicionamento ideal dos pontos de controle na área mapeada são fatores complexos e dependem de inúmeras variáveis. Esperava-se que conforme o aumento da quantidade de pontos de controle a média dos erros RMSs diminuísse até um determinado ponto, e então começasse a subir devido ao excesso. Contudo, para uma análise primária, a média dos RMSs dos pontos de controle somente cresceu proporcionalmente com a adição de mais pontos, chegando a um erro de 10,10 centímetros para o modelo apoiado sobre 10 pontos, como pode ser observado no Quadro 11. Todos os modelos apoiados sobre 5 ou mais pontos apresentaram um erro superior a quatro vezes o GSD utilizado. Essa situação pode ter ocorrido devido ao tamanho da área de cobertura, pois se tratando de uma área de 0,22 quilômetros quadrados, o número ideal de pontos de controle utilizados não deve ser superior a 4 pontos.

Na Figura 68 está ilustrada a configuração do modelo apoiado sobre 3 pontos de controle (pontos 3, 6 e 11).

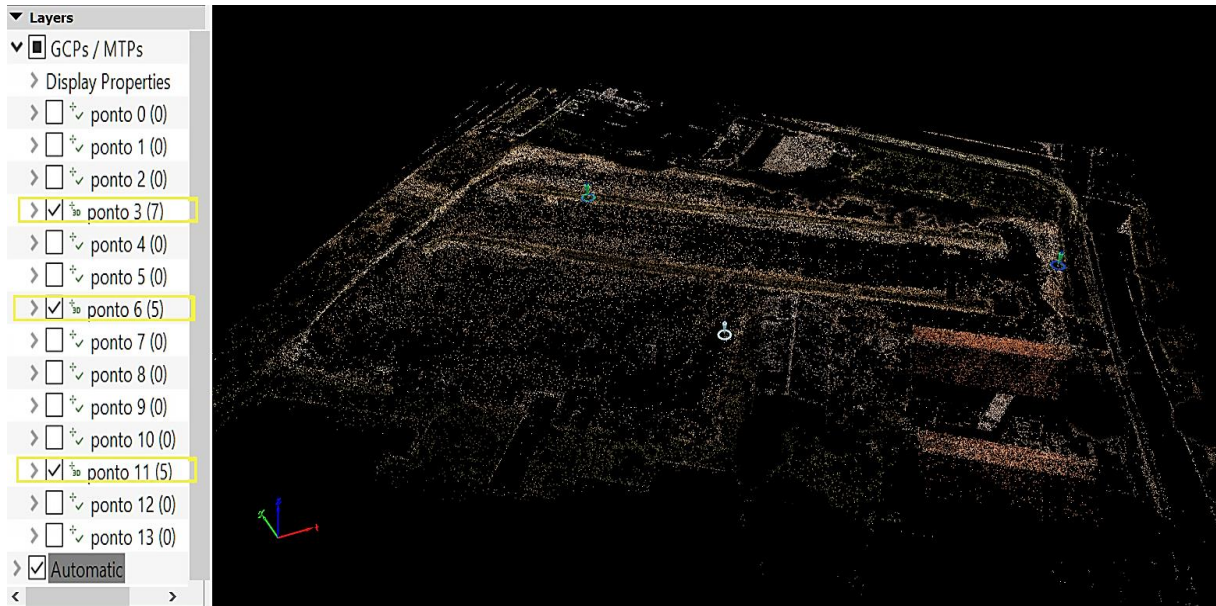


Figura 68 – Nuvem de Pontos e Pontos de Controle
Fonte: Os Autores (2016).

Para os demais resultados utilizando 2, 3 e 4 pontos de controle, o RMS médio calculado pelo programa ficou menor que quatro vezes o valor do GSD, significando que essas configurações são aceitáveis para utilização. Nos Quadros 12, 13 e 14 estão apresentados os resultados dos erros obtidos para os Pontos de Controle e para os Pontos de Verificação.


Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
ponto 2 (3D)	0.020/ 0.020	0.004	0.018	-0.043	2.558	14 / 14
ponto 9 (3D)	0.020/ 0.020	0.000	-0.000	0.000	0.865	11 / 11
Mean [m]		0.001928	0.008914	-0.021122		
Sigma [m]		0.001850	0.009095	0.021467		
RMS Error [m]		0.002672	0.012735	0.030116		

0 out of 12 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
ponto 1	0.0200/0.0200	-0.1491	0.0338	0.3412	0.8045	17 / 17
ponto 3	0.0200/0.0200	-0.2104	-0.0300	-0.0818	0.9151	15 / 15
ponto 4	0.0200/0.0200	-0.1644	0.0127	0.0566	1.0212	19 / 20
ponto 5	0.0200/0.0200	-0.1194	-0.0312	-0.9250	2.0645	14 / 14
ponto 6	0.0200/0.0200	-0.1333	-0.0368	-0.3150	1.2068	15 / 16
ponto 7	0.0200/0.0200	-0.0692	-0.0273	-0.3320	1.6785	14 / 14
ponto 8	0.0200/0.0200	-0.0206	-0.0332	0.0064	3.7278	8 / 8
ponto 10	0.0200/0.0200	-0.0685	0.0088	0.1201	0.5938	15 / 15
ponto 11	0.0200/0.0200	-0.0974	0.0394	0.2153	0.7854	15 / 15
ponto 12	0.0200/0.0200	-0.0890	0.0131	-0.2480	2.1942	14 / 14
ponto 13	0.0200/0.0200	-0.0007	0.0580	0.0426	1.9156	11 / 11
ponto 14	0.0200/0.0200	-0.1227	0.1115	0.9283	1.0435	6 / 7
Mean [m]		-0.103740	0.009915	-0.015929		
Sigma [m]		0.056869	0.043594	0.425656		
RMS Error [m]		0.118305	0.044707	0.425954		

Quadro 12 – Configuração para 2 Pontos de Controle
Fonte: Os Autores (2016).

 Ground Control Points 



GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
ponto 4 (3D)	0.020/ 0.020	-0.026	-0.011	0.001	1.028	19 / 20
ponto 7 (3D)	0.020/ 0.020	0.002	-0.027	0.001	1.673	14 / 14
ponto 12 (3D)	0.020/ 0.020	0.021	0.028	-0.013	2.163	14 / 14
Mean [m]		-0.000861	-0.003268	-0.003579		
Sigma [m]		0.019307	0.022809	0.006865		
RMS Error [m]		0.019327	0.023042	0.007742		

0 out of 11 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
ponto 1	0.0200/0.0200	-0.0117	0.0224	0.3707	0.8062	17 / 17
ponto 2	0.0200/0.0200	0.1642	-0.0171	-0.2737	2.5517	14 / 14
ponto 3	0.0200/0.0200	-0.0550	-0.0692	-0.3201	0.9210	15 / 15
ponto 5	0.0200/0.0200	-0.0069	-0.0495	-0.8182	2.1150	14 / 14
ponto 6	0.0200/0.0200	-0.0646	-0.0432	-0.0028	1.2259	15 / 16
ponto 8	0.0200/0.0200	0.0541	-0.0097	0.4165	3.7376	8 / 8
ponto 9	0.0200/0.0200	0.0765	0.0221	0.4004	0.8848	11 / 11
ponto 10	0.0200/0.0200	0.0280	0.0153	0.3868	0.6013	15 / 15
ponto 11	0.0200/0.0200	0.0146	0.0408	0.3933	0.7763	15 / 15
ponto 13	0.0200/0.0200	0.1094	0.0816	0.3585	1.9627	11 / 11
ponto 14	0.0200/0.0200	0.0317	0.1321	0.9182	1.0394	6 / 7
Mean [m]		0.030929	0.011425	0.166324		
Sigma [m]		0.065059	0.056457	0.456248		
RMS Error [m]		0.072036	0.057601	0.485619		

Quadro 13 – Configuração para 3 Pontos de Controle

Fonte: Os Autores (2016).

 Ground Control Points 

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
ponto 4 (3D)	0.020/ 0.020	0.000	-0.011	0.043	1.107	19 / 20
ponto 5 (3D)	0.020/ 0.020	-0.007	-0.023	-0.109	2.221	14 / 14
ponto 7 (3D)	0.020/ 0.020	0.021	-0.006	0.038	1.679	14 / 14
ponto 12 (3D)	0.020/ 0.020	-0.007	0.029	-0.016	2.070	14 / 14
Mean [m]		0.001701	-0.002500	-0.010974		
Sigma [m]		0.011371	0.019322	0.061250		
RMS Error [m]		0.011497	0.019483	0.062225		

0 out of 10 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
ponto 1	0.0200/0.0200	0.0261	0.0369	0.1930	0.8582	17 / 17
ponto 2	0.0200/0.0200	0.2235	-0.0584	-1.2335	2.6012	14 / 14
ponto 3	0.0200/0.0200	-0.0161	-0.1088	-0.9829	0.9363	15 / 15
ponto 6	0.0200/0.0200	-0.0553	-0.0087	0.0572	1.2135	15 / 16
ponto 8	0.0200/0.0200	0.0938	-0.0739	-0.0745	3.7173	8 / 8
ponto 9	0.0200/0.0200	0.1092	-0.0345	0.0075	0.9455	11 / 11
ponto 10	0.0200/0.0200	0.0231	0.0289	0.7853	0.6357	15 / 15
ponto 11	0.0200/0.0200	0.0058	0.0634	0.7768	0.7998	15 / 15
ponto 13	0.0200/0.0200	0.0728	0.0627	-0.4019	2.0441	11 / 11
ponto 14	0.0200/0.0200	-0.0084	0.1620	-1.8978	0.9667	6 / 7
Mean [m]		0.047448	0.006967	-0.277096		
Sigma [m]		0.076206	0.076096	0.821542		
RMS Error [m]		0.089770	0.076414	0.867015		

Quadro 14 – Configuração para 4 Pontos de Controle

Fonte: Os Autores (2016).

Os resumos dos parâmetros estatísticos desses três levantamentos estão descritos no Quadro 15.

	média X	δ_x	média Y	δ_y	média Z	δ_z
2 pontos	-0,1037	0,0569	0,0099	0,0436	-0,0159	0,4257
3 pontos	0,0309	0,0651	0,0114	0,0565	0,1663	0,4562
4 pontos	0,0474	0,0762	0,0070	0,0761	-0,2771	0,8215

Quadro 15 – Média e Desvio Padrão de Cada Eixo para Diferentes Pontos de Controle

Fonte: Os Autores (2016).

Para verificar se há diferença entre os resultados obtidos nos três levantamentos, realizou-se um teste estatístico comparando os valores dos erros médios para cada eixo, onde entende-se como erro médio a média das diferenças entre as coordenadas reais e as coordenadas computadas pelo programa dos pontos de verificação nos três eixos cartesianos, e os resultados estão descritos no Quadro 16 abaixo:

		2 pontos VS 3 pontos	3 pontos VS 4 pontos
X	D	0,0728	0,0165
	σ_D	0,0864	0,1002
Y	D	0,0015	0,0045
	σ_D	0,0713	0,0948
Z	D	0,1504	0,1108
	σ_D	0,6240	0,9397

Quadro 16 – Comparativo entre Resultados

Fonte: Os Autores (2016).

O parâmetro “D” é o resultado da diferença entre as médias de cada caso, por exemplo: (media X_2 – média X_3). O parâmetro σ_D , de uma forma simplificada, segue a Equação 8 a seguir:

$$\sigma_D = \sqrt{\delta_i^2 + \delta_j^2} \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde os índices i e j representam os casos analisados.

Os resultados serão estatisticamente diferentes caso “D” seja maior que σ_D .

Avaliando os resultados do Quadro 16 pode-se observar que para todas as coordenadas em ambos os casos o valor de D é menor que σ_D . Por isso, os valores apresentam intervalos em comum e, portanto são estatisticamente iguais.

Conclui-se estatisticamente que, com 68,2% de probabilidade, em um intervalo de confiança de $\pm \sigma$, as três situações são iguais, tornando facultativa a escolha do usuário. Todavia, a Pix4D³ (2016) recomenda não utilizar menos que 3 pontos de controle para o georreferenciamento indireto, sendo um número ideal de 5 a 10 pontos. Seguindo a recomendação do desenvolvedor e respeitando os resultados do relatório de qualidade gerado pelo programa, optou-se por utilizar o modelo apoiado sobre 3 pontos de controle, pois além de apresentar um erro RMS médio inferior ao modelo apoiado sobre 4 pontos de controle, deve-se otimizar o trabalho em campo.

Analisando os resultados para 3 pontos de controle, assumindo que a dispersão dos erros para os modelos gerados seguem uma distribuição Gaussiana, para um intervalo de confiança de $\pm \sigma$, os resultados obtidos pelo Quadro 13 mostram que, para 68,2% de probabilidade, a acurácia do modelo georreferenciado foi de $3,09 \pm 7,20$ centímetros para o eixo X, $1,14 \pm 5,76$ centímetros para o eixo Y, e $16,63 \pm 48,56$ centímetros para o eixo Z.

Analisando as conclusões e os resultados obtidos no estudo de caso da empresa DronEng (2016) apresentado no tópico 2.4.2, aborda-se de uma forma diferente a definição utilizada para acurácia, e a conclusão tomada para os resultados apresentados. A empresa afirma que a acurácia é determinada pelo valor do RMS calculado pelo programa Pix4Dmapper, e conclui o estudo afirmando que o projeto atendeu seu objetivo, pois a acurácia obtida enquadrou-se no intervalo de 1 a 1,5 vezes o GSD adotado no plano XY, e de 2 a 3 vezes o GSD no eixo Z. No entanto, a acurácia trata-se de um intervalo de resultados, e por isso optou-se por considerar os resultados de uma maneira mais estatística.

Analisando os dados apresentados pela empresa no Quadro 4 conclui-se que, para as mesmas considerações estatísticas assumidas nas situações acima, a acurácia do modelo foi de $0,4 \pm 1,7$ centímetros para o eixo X, $2,66 \pm 5,10$ centímetros para o eixo Y e $7,64 \pm 8,27$ centímetros para o eixo Z. Calculando uma média dos valores para o plano XY, a acurácia obtida é de $2,69 \pm 5,38$ centímetros. Normalizando os resultados obtidos com o GSD utilizado no projeto, é possível relacionar a acurácia com o valor do GSD através de Fatores Multiplicadores.

No Quadro 17 está apresentado a comparação entre os erros obtidos e esses fatores multiplicadores do estudo de caso da DronEng (2016), do

levantamento realizado por este trabalho por georreferenciamento pelo GPS do Phantom, e do levantamento apoiado sobre os 3 pontos de controle adotados.

68,2% Confiança	X		Y		Plano (XY)		Z		GSD (cm)
	Erro Médio (cm)	RMS Médio (cm)	Erro Médio (cm)	RMS Médio (cm)	Erro Médio (cm)	RMS Médio (cm)	Erro Médio (cm)	RMS Médio (cm)	
DronEng (2016)	0,40 ± 1,70		2,66 ± 5,10		2,69 ± 5,38		7,64 ± 8,27		3,00
GPS VANT	13,31 ± 22,67		22,03 ± 46,96		25,74 ± 52,15		1600,38 ± 1600,38		1,66
3 Pontos de Controle	3,09 ± 7,20		1,14 ± 5,76		3,29 ± 9,22		16,63 ± 46,56		1,67
	Fator Multiplicador								
	XY				Z				
DronEng (2016)	2,69				5,30				
GPS VANT	46,92				1928,17				
3 Pontos de Controle	7,49				37,84				

Quadro 17 – Comparativo entre Acurácias e GSDs
Fonte: Os Autores (2016).

Os resultados obtidos para o Fator Multiplicador para o plano XY e para o eixo Z são calculados como o módulo do limite superior máximo do intervalo de confiança do erro obtido pelo valor do GSD do projeto. Com 68,2% de probabilidade a acurácia calculada do levantamento para o estudo de caso da DronEng (2016) é de 8,07 centímetros, 2,69 vezes o valor do tamanho do pixel para o plano XY, e de 15,91 centímetros, 5,30 o valor do tamanho do pixel para o eixo Z, contradizendo a conclusão apresentada pelo estudo de caso da DronEng (2016), o qual afirma que a acurácia do levantamento é representada pelo índice RMS, cujo valor para o plano XY é de 5,38 centímetros, resultando em 1,79 vezes o GSD, e de 8,27 centímetros para o eixo Z, resultando em 2,75 vezes o GSD.

A Pix4D¹ (2016) recomenda valores aceitáveis para o plano XY de 1 a 2 vezes o valor do GSD, e para o eixo Z de 1 a 3 vezes. Obter resultados fora do intervalo recomendado pelo desenvolvedor não significa que o levantamento está errado e deve ser descartado, isso indica que os resultados podem ser melhorados pela modificação de algum parâmetro no planejamento do voo, seja modificar a altura do voo, modificar os parâmetros de configuração da câmera, o modo de tomada de imagens (*fast* ou *safe mode*), ou ainda, aumentar o GSD do levantamento, como observado por Siebert e Teizer (2014) no item 2.4.1.1, na Tabela 8, em que os autores aumentaram a altura de voo para 50 metros e obtiveram menores erros quando comparado com o levantamento executado por Neitzel *et al* (2011) o qual realizou o levantamento a uma altura de 30 metros.

Para os resultados obtidos pelo georreferenciamento do GPS do Phantom percebe-se pouca acurácia do levantamento no plano XY com 46,92 vezes o valor do GSD. Para o eixo Z o erro observado foi expressivo sendo 1928 vezes o valor do GSD adotado. A proporção desse erro deve-se à incerteza do referencial da coordenada Z adotado no programa. Talvez as cotas iniciais georreferenciadas pelo GPS geodésico dos pontos Ré e de posicionamento da estação total estejam erradas, ou o sistema de referência adotado no programa para o eixo Z não coincide com o utilizado no georreferenciamento pelo GPS geodésico.

Algumas opções do sistema de referência para o eixo vertical poderiam ser escolhidas e estão ilustradas na Figura 69.

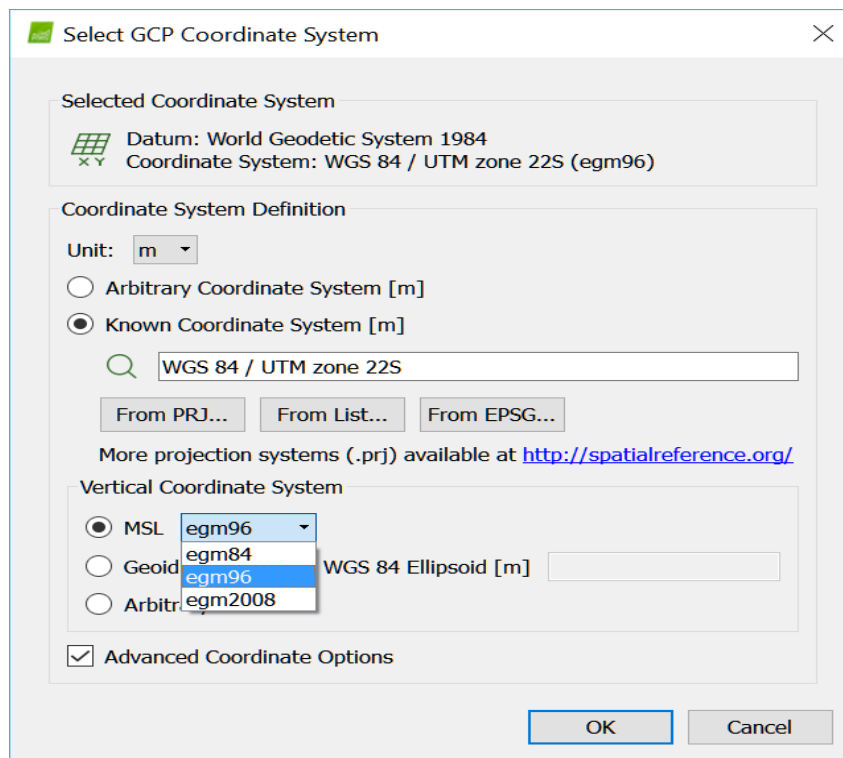


Figura 69 – Opções para Referência de Cota.
Fonte: Os Autores (2016).

Para o levantamento apoiado sobre 3 pontos de controle a acurácia alcançada foi de 12,51 centímetros, 7,49 vezes o valor do GSD para o plano XY e de 63,19 centímetros, 37,84 vezes o valor do GSD para o eixo Z. Apesar dos resultados não estarem dentro do intervalo recomendado pela Pix4D¹ (2016), podem ser considerados satisfatórios para levantamentos planimétricos cadastrais de classe P2 e P3, cujos erros máximos não devem ser superiores a 20 e 50 centímetros, respectivamente. Se apenas o valor do RMS for considerado como a acurácia do levantamento, os resultados encontrados são 9,22 centímetros para o plano XY,

5,52 vezes o GSD, e 46,46 centímetros para o eixo Z, resultando em 27,88 vezes o GSD do projeto.

Outro ponto importante a ser destacado é a diferença dos resultados obtidos entre o levantamento planimétrico apoiado sobre pontos de controle e o apoiado somente sobre os pontos georreferenciados pelo GPS do VANT. O aumento da acurácia do levantamento planimétrico apoiado sobre os 3 pontos de controle em relação ao georreferenciado pelo GPS do VANT foi de 522,62%, justificando a utilização dos pontos de controle para atingir resultados mais acurados.

4.1.3 Acurácia Relativa para Modelo Apoiado sobre 3 Pontos de Controle

A acurácia relativa é o parâmetro que compara características individuais representadas no MDS, MDT e na ortofoto. Por exemplo, a distância horizontal entre dois pontos representados no modelo comparada com a distância real existente entre eles. Para essa análise foram calculadas as distâncias entre 9 pontos de verificação e o ponto aonde foi posicionada a estação total. As medidas e o cálculo da média com o desvio padrão amostral estão apresentados no Quadro 18.

	Dist. Horiz. ET (m)	Dist. Horiz. Computada (m)	Erro (m)	Erro relativo
PC 1	32,793	32,860	0,067	0,20%
PC 2	34,407	34,480	0,073	0,21%
PC 4	33,736	33,710	0,026	0,08%
PC 5	83,865	83,780	0,085	0,10%
PC 8	79,633	79,560	0,073	0,09%
PC 9	49,662	49,630	0,032	0,06%
PC 10	29,882	29,860	0,022	0,07%
PC 12	45,788	45,830	0,042	0,09%
PC 14	45,479	45,460	0,019	0,04%
Média dos Erros (cm)			4,878	0,11%
Desvio Padrão (cm)			2,566	0,0603%

Quadro 18 – Comparação entre Medidas do Modelo Apoiado por 3 Pontos de Controle
Fonte: Os Autores (2016).

Para a análise dos erros para as medidas apresentadas no Quadro 18, a distribuição dos dados pertencentes ao intervalo de confiança aproxima-se de uma

distribuição Gaussiana com 66,66%. Considerando o erro sistemático de 0,02 metros, é possível calcular o valor de RMS para a distribuição à cima. Onde:

$$\text{RMS} = \sqrt{\sigma m_i^2 + \sigma s_i^2} \quad \text{Eq. (9)}$$

Sendo: σ_m = desvio da média

σ_s = erro sistemático

Portanto a média encontrada para a distribuição das medidas e seu respectivo erro, com 68,2% de probabilidade, tem o valor de $4,88 \pm 2,17$ centímetros para o plano XY.

Aumentando o intervalo de confiança para 99,6% de confiança deve-se multiplicar o erro encontrado por 3, resultando em: $4,88 \pm 6,52$ centímetros.

Assumindo que a acurácia do levantamento é representada pela máxima incerteza possível ($4,88 + 6,52 = 11,40$), o cálculo do fator de multiplicação para um GSD de 1,67 centímetros, com 99,6% de confiança, resulta em 6,83 vezes o GSD. No entanto, como o RMS já considera o desvio da média e a variância em seu cálculo, ele é o melhor indicador para represar o erro do projeto (PIX4D², 2016), resultando um valor de 3,9 vezes o valor do GSD.

Comparando os resultados obtidos da acurácia relativa das medidas representadas no Quadro 18 com os resultados obtidos por Santos (2016) no Quadro 8, pode-se concluir que o erro médio calculado em ambos os estudos atingiram valores muito próximos, de 0,09% para Santos (2016) e 0,11% para o presente trabalho no plano XY. Santos (2016) calculou o desvio padrão de 0,15% sendo que o obtido neste trabalho foi de 0,06%. O desvio padrão menor obtido neste último pode ser explicado pela quantidade maior de pontos que os autores utilizaram para realizar a análise dos erros, pois tendo quantidades maiores a dispersão dos valores com relação à média pode ser mais bem aproximada à realidade.

4.2 ANÁLISE GRÁFICA DOS RESULTADOS

4.2.1 Modelo Digital de Superfície

O resultado gerado pelo processamento dos dados para o MDS está representado na Figura 70. Percebe-se boa qualidade gerada no modelo, apresentando boa nitidez, nível de detalhamento adequado às expectativas do equipamento.



Figura 70 – Modelo Digital de Superfície
Fonte: Os Autores (2016).

4.2.2 Modelo Digital do Terreno

O MDT representa em escala de cores as elevações, os níveis do terreno, eliminando as malhas de superfícies representadas no modelo, enfatizando somente a forma da superfície representada em escala de cores. Na Figura 71 está ilustrado o modelo gerado.

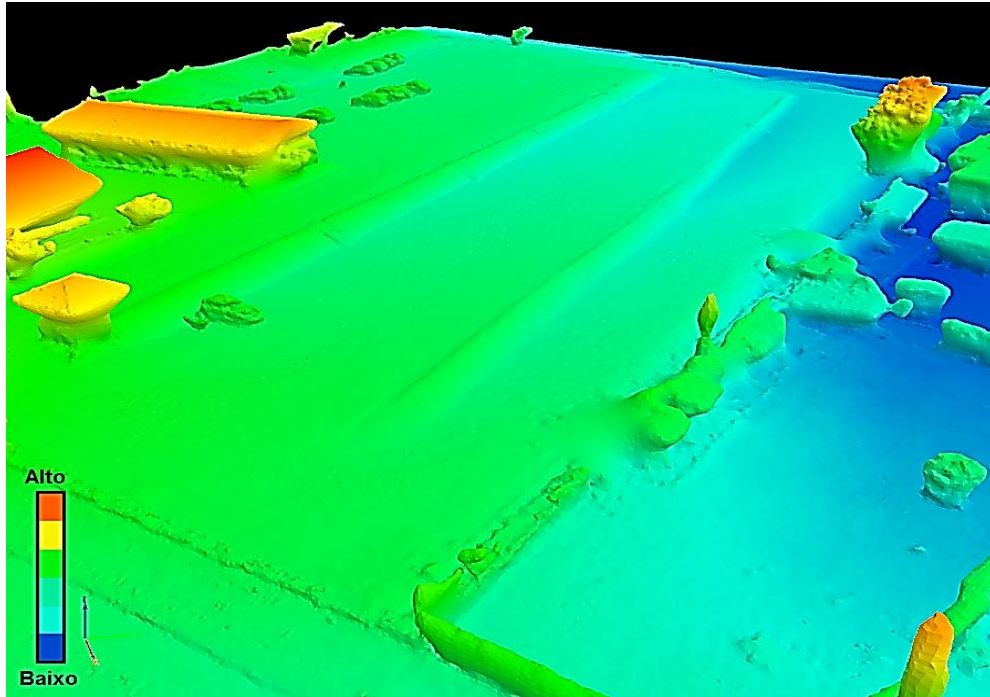


Figura 71 – Modelo Digital do Terreno
Fonte: Os Autores (2016).

4.2.3 Análise Comparativa

Comparando o resultado do MDS gerado pelo presente trabalho na Figura 72, caso (1), com o resultado gerado pelo Trabalho de Santos (2016), caso (2), cuja configuração do SANT é mais adequada para a atividade de mapeamento aéreo, percebe-se que a qualidade do detalhamento de 2 é melhor que a gerada em 1. Isso se deve à configuração da câmera utilizada por Santos (2016). Contudo, deve-se analisar a necessidade do cliente, em muitos casos o detalhamento obtido pelo sistema empregado neste trabalho sana a necessidade para as maiores atividades do ramo da engenharia e da agricultura. É possível melhorar ainda mais a resolução do MDS, configurando manualmente os parâmetros da câmera, mas isso pode ser uma análise para futuros trabalhos.



Figura 72 – Comparação entre diferentes MDS.
Fonte: Os Autores (2016).

4.2.4 Ortofoto

Uma seção da ortofoto gerada pelo processamento dos dados está representada pela Figura 73. O formato da imagem gerada pelo *software* Pix4Dmapper é tif, e é pela ortofoto que os resultados de medidas e posicionamento geográfico podem ser obtidos conforme a acurácia discutida neste trabalho. Na Figura 74 está ilustrado, em escala maior, o detalhamento do alvo colocado para auxiliar a demarcação dos pontos de controle e verificação.



Figura 73 – Seção da Ortofoto Gerada pelo Programa
Fonte: Os Autores (2016).



**Figura 74 – Detalhamento de Alvo Utilizado para Ponto de Controle
Fonte: Os Autores (2016).**

A ortofoto gerada apresentou resolução satisfatória, apresentando bom detalhamento dos elementos que integram a imagem. Como o GSD utilizado foi de 1,67 centímetros, qualquer objeto que tenha dimensões maiores que o GSD do projeto poderá ser visualizado na foto. Uma apresentação mais completa da ortofoto, como já mencionado no item 3.5, é a ortofotocarta que é a representação das curvas de nível sobre a ortofoto do terreno. Com as curvas de nível representadas na ortofoto, é possível analisar a altimetria do terreno. Isso pode facilitar o entendimento do relevo na planta impressa, quando não é possível visualizar os Modelos Digitais de Elevação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelas análises realizadas no presente Trabalho de Conclusão de Curso, puderam-se verificar os resultados obtidos para o Sistema Aéreo Não Tripulável de baixo custo proposto, através de uma análise comparativa com outros sistemas mais sofisticados e apropriados para o mapeamento aéreo geográfico. Conhecendo as limitações do sistema, como a acurácia e a qualidade dos modelos digitais pretendidas, o Phantom 3 *Advanced* apresentou resultados satisfatórios para a atividade de mapeamento aéreo geográfico no presente estudo. Acredita-se que o SANT proposto possa ser utilizado para atividades de mapeamento em geral, desde que o levantamento seja apoiado por pontos de controle em campo. Este estudo definiu um número ideal de 3 pontos de controle a serem utilizados para o terreno em questão, através do teste estatístico comparativo entre as diferentes configurações propostas.

Os resultados obtidos para o eixo Z dos levantamentos apresentaram uma imprecisão elevada de 63,19 centímetros quando apoiado sobre 3 pontos de controle, e de 32 metros sem o georreferenciamento indireto do modelo. Esses resultados acusam algum possível erro na referência das coordenadas no eixo Z.

No presente trabalho, foram analisados os resultados dos levantamentos aerofotogramétricos realizados com VANTs específicos para mapeamento aéreo dos estudos de caso apresentados na seção 2.4.

Explicou-se de forma sucinta o procedimento para a realização de um levantamento topográfico utilizando uma estação total.

Foi apresentado um sistema de baixo custo para atividades de mapeamento aéreo, e explicado os processos envolvidos para a execução da atividade, desde o planejamento do voo à geração dos produtos finais (MDT, MDS e ortofoto).

Na seção 4.1 realizou-se uma análise da acurácia dos resultados gerados em diferentes configurações, para o georreferenciamento com e sem pontos de controle, comparando as diferenças das medidas dos modelos gerados com as medidas reais absolutas obtidas pela estação total. Além disso, os resultados obtidos pelo sistema proposto neste artigo foram bem próximos aos resultados obtidos por VANTs específicos para atividades de mapeamento aéreo, como por exemplo, a acurácia absoluta alcançada no levantamento apoiado sobre 3 pontos de

controle de 12,51 centímetros comparada aos 8,07 centímetros obtidos pelo estudo de caso da DronEng (2016), e o erro relativo de 0,09% alcançado por Santos (2016) com o erro relativo de 0,11% obtido no neste trabalho.

Para análises futuras, recomenda-se utilizar diferentes programas de processamento para avaliar a variação dos resultados gerados para um mesmo modelo, como por exemplo, comparar os erros calculados no Pix4D com os calculados pelo PhotoScan. Podem-se comparar também os resultados obtidos por diferentes alturas de voo e verificar qual configuração apresentaria melhores resultados. Outra análise interessante seria avaliar o desempenho do SANT adotado para atividades de mapeamento de obras de terraplanagem com maiores irregularidades no terreno, para que seja possível simular o cálculo de volumes e áreas.

Para a elaboração deste artigo acadêmico notou-se bastante dificuldade no entendimento e na abordagem dos conceitos relacionados à área da geomática, e nos processos e conceitos envolvidos em atividades de mapeamento aéreo, tendo em vista que estes assuntos não estão inseridos na matriz curricular do curso de engenharia civil da UTFPR – Curitiba. Portanto, como a utilização dos VANTs mostra-se uma atividade promissora para a área de engenharia, recomenda-se a inserção de disciplinas que possam dar bases ao entendimento do processo de mapeamento aéreo no curso de engenharia civil desta universidade.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Angelo. **Geoprocessamento**. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. 2010. 1-34 p. Belo Horizonte- MG. Disponível em: <http://csr.ufmg.br/geoprocessamento/publicacoes/AngeloAbreu_2010_TEXTO.pdf> Acesso em: 30 Jul. 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Drones**. 2015. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/drones#wrapper> > Acesso em: 11 nov. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13133**: Execução de Levantamento Topográfico. Rio de Janeiro, 1994.
- BARTEL, Beth. **GPS Data Collection Methods**. UNAVCO Knowledge base. 2010. Disponível em: < <http://kb.unavco.org/kb/article.php?id=70>> Acesso em: 08 ago. 2016.
- BARTEL, Beth. **What is the Difference Between GPS and GNSS?**. UNAVCO Knowledge base. 2013. Disponível em: <<http://kb.unavco.org/kb/article/what-is-the-difference-between-gps-and-gnss-167.html>.> Acesso em: 08 ago. 2016
- BEARD, Randal *et al.* **Autonomous Vehicle Technologies for Small Fixed-Wing UAVs**. Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication. Vol. 2. Brigham Young University, Provo, Utah, 2005. Disponível em: <<http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/1.8371>> Acesso em: 13 ago. 2016.
- BORGES, Alberto de Campos, **Topografia Aplicada à Engenharia Civil**, São Paulo – SP: Blucher, Vol. 2, 2013.
- CÂMARA, Gilberto; MEDEIROS, José Simeão de. **Geoprocessamento Para Projetos Ambientais**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, SP: 2ª Edição, 1998. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/Orosto.pdf> Acesso em: 3 out. 2016.

CARMINATO, Larissa Porteiro; LEITE, Gabriella Teixeira Dias; PAMBOUKIAN, Sergio Vicente Denser. **Utilização De Imagens De Sensoriamento Remoto Em Projetos De Geoprocessamento**. 2015. Universidade Mackenzie, São Paulo – SP, 2015. Disponível em:

<http://labgeo.mackenzie.br/fileadmin/LABGEO/Trabalhos/Alice/06._Utilizacao_de_imagens_de_Sensoriamento_Remoto_em_projetos_de_Geoprocessamento.pdf> Acesso em: 27 Jul. 2016.

CARVALHO, Edilson Alves de; ARAÚJO, Paulo César de. **Noções Básicas de Sistema de Posicionamento Global GPS**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Aula 08 2009. Disponível em:

<http://www.ead.uepb.edu.br/arquivos/cursos/Geografia_PAR_UAB/Fasciculos%20-%20Material/Leituras_Cartograficas_II/Le_Ca_II_A08_MZ_GR_260809.pdf> Acesso em: 21 set. 2016.

CRUZ, Carla Bernadete Madureira *et al.* **Avaliação da exatidão planialtimétrica dos modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) obtidos através do LIDAR**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...**. Curitiba: Sbsr, 2011. p. 5463 - 5470. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1096.pdf>> Acesso em: 11 out. 2016.

DJI. Página comercial. 2016. Disponível em: <www.dji.com> Acesso em: 11 ago. 2016.

DRONENG Drones e Engenharia. **Mapeamento Aéreo com Drones**. Youtube, 2 out. 2015. (54:35 min). Disponível em:

https://www.youtube.com/watch?v=UfuEe2qV_QY&list=PLAteWur25YIS8Ci1G3PSzwT7bvjubkRgE&index=1. Acesso em: 11 ago. 2016.

DRONENG Drones e Engenharia. Blog de Discussões. 2016. Disponível em: <<http://blog.droneng.com.br/>> Acesso em: 03 nov. 2016.

DRONENG Drones e Engenharia. **Case Técnico Topografia X Fotogrametria**. 2016. Disponível em:

<https://drive.google.com/file/d/0B64h_BNFmTbnVTY0WW5LQzBSVKE/view> Acesso em: 23 out. 2016.

ECOMAPA. **Geoprocessamento e Georreferenciamento**. Ecomapa Engenharia Ambiental. 2016. Disponível em:

<<http://www.ecomapa.com.br/ecomapa/servicos.asp?cod=13>> Acesso em: 15 out. 2016.

ESTEIO ENGENHARIA. Disponível em:
<http://www.esteio.com.br/?pagina=downloads/trab_artigos/cam_areo_digi.php>
Acesso em: 23 ago. 2016.

FONTES, Luiz Carlos A. de A.. **Fundamentos de Aerofotogrametria**. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2005. 18 slides, Disponível em:
<<http://www.topografia.ufba.br/nocoes%20de%20aerofotogrametriapdf.pdf>> Acesso em: 6 nov. 2016.

FUNDAMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO. Laboratório de Topografia e Cartografia (LTC). Universidade Federal do Espírito Santo. – UFES. 200?. Disponível em:
<<http://www.metrogeo.org.br/arquivos/Modulo%20Geoprocessamento.pdf>> Acesso em: 12 out. 2016.

GIS *GEOGRAPHY*. **What Is Geographic Information Systems?**. Out. 2016. Disponível em: <<http://gisgeography.com/what-gis-geographic-information-systems>> Acesso em: 14 Out. 2016.

GOMES, Helton Simões. **ANAC Usará Primeiros Pilotos de Drone como Teste para Criar Certificação**. Portal G1 Tecnologia. Maio 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/tecnologia/noticia/2016/05/anac-usara-primeiros-pilotos-de-drone-como-teste-para-criar-certificacao.html>> Acesso em: 11 nov. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Geodésia**. 2016. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/>> Acesso em: 4 out. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA . **Recomendações Para Levantamentos Relativos Estatísticos – GPS**. 2008. 35p. Disponível em: <http://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rec_om_gps_internet.pdf> Acesso em: 30 set. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA . **Resolução H PR nº22, de 21-07-83**. 36 p. 1983. Disponível em: <<http://www.inde.gov.br/images/inde/bservico1602.pdf>> Acesso em 22 out. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA. **Norma Técnica Para Georreferenciamento de Imóveis Rurais**. 1ª Edição, 2003. Disponível em: <http://www.farsul.org.br/sindical/Normas_Georreferenciamento.pdf> Acesso em 20 out. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA. **O que é Georreferenciamento?**. Março 2009. Disponível em: <<http://www.incra.gov.br/o-que-e-georreferenciamento>> Acesso em: 4 out. 2016.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA. **Teoria dos Erros**. 2016. Disponível em: <<http://www.fis.ita.br/labfis24/erros/errostextos/erros2.htm>> Acesso em: 15 out. 2016.

JAUCH, Felipe Eugenio; SILVA, Larissa dos Santos; PAZ, Otacílio Lopes de Souza da. **Sistema de Posicionamento Global – GPS**. Universidade Federal do Paraná – UFPR. 2014. Disponível em: <<http://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/37756>> Acesso em: 25 set. 2016.

JERONYMO, Andre Colares; PEREIRA, Pâmela B. A. **Comparação de Métodos de Levantamento Topográfico, Utilizando Escâner a LASER, Estação Total e Fotogrametria Terrestre**. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

LEICA. **Leica FlexLine TS06plus Manual Total Station**. 2016. Disponível em: <<http://leica-geosystems.com/products/total-stations/manual-total-stations/leica-flexline-ts06plus>> Acesso em: 09 nov. 2016.

MCCORMAC, Jack C. **Topografia**. 5ª Ed. LTC, 2007.

MENESES, Paulo Roberto; DE ALMEIDA, Tati. **Introdução Ao Processamento De Imagens De Sensoriamento Remoto**. CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, UNB – Universidade de Brasília. Brasília. 2012. Disponível em: <<http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>> Acesso em: 25 julho 2016.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA . **Educação Profissional Referenciais Curriculares Nacionais da Educação Profissional de Nível Técnico**. Brasília, 2000. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/setec/arquivos/pdf/geomatic.pdf> Acesso em: 30 Junho, 2016.

MORAES, Elisabete Caria de. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. 2002. Capítulo 1. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 22 f. Disponível em: <http://www.selperbrasil.org.br/cursos/spring/SenRemoto_intro.pdf > Acesso em: 27 Jul. 2016

MUNDOGEO (Org.). **Ortofoto: a imagem que é um mapa**. 2000. Disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2000/12/01/ortofoto-a-imagem-que-e-um-mapa/>>. Acesso em: 20 out. 2016.

NEITZEL F. *et al.* **Mobile 3D Mapping mit einem low-cost UAV-System am Beispiel der Deponievermessung, Proceedings of Oldenburger 3D Tage (Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik)**. Wichmann Herbert, 2011. 300-311 p. Disponível em: <<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84893584873&origin=inward&txGid=DDBADF07700A386C76DC79FFAF928A60.wsnAw8kcdt7IPYLO0V48gA%3a2#>> Acesso em: 03 nov. 2016.

NUNES, Emanuel Jr. Da S.; NAKAI, Érica; BARROS, Pedro Paulo da S. **Apontamentos de Aula: Sistema Global de Posicionamento (GPS)**. Universidade de São Paulo – USP. Piracicaba-SP. 2013. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/disciplinas/Topo/leb450/Fiorio/APOSTILA_GPS_pdf.pdf> Acesso em 22 set. 2016.

KEMP, Karen. **Geomatics**. Encyclopedia of Geographic Information Science. SAGE Publisher. 2007. Disponível em: <<http://yvanbedard.scg.ulaval.ca/wp-content/documents/publications/462.pdf>> Acesso em: 24 jun. 2016.

KUGLER, Angela. **Qual a Escala de Um Voo Digital?** 2008. Disponível em: <<http://www.esteio.com.br/?pagina=downloads/downloads.php>>. Acesso em: 25 out. 2016.

PAINE, David P.; KISER, James D.. **Aerial Photography and Image Interpretation**. 3. ed. Corvallis: John Wiley & Sons, 2012. 648 p. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118110997.fmatter/pdf>> Acesso em: 8 out. 2016.

PIX4D¹. **Accuracy of Pix4Dmapper Outputs**. Disponível em: <<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202558889#gsc.tab=0>> Acesso em: 12 nov. 2016.

PIX4D². **How are the GCP Errors defined in the Quality Report?**. Disponível em: <<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/203604125-How-are-the-GCP-Errors-defined-in-the-Quality-Report-#label3>> Acesso em: 12 nov. 2016.

PIX4D³. **Quality Report Help?**. Disponível em: <<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202558689-Quality-Report-Help#label9>> Acesso em: 12 nov. 2016.

PIX4D⁴. **Pix4Dcapture – Manual**. Disponível em: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204010419--iOS-Pix4Dcapture-Manual#label-sett3>. Acesso em: 11 nov. 2016.

PORTAL EDUCAÇÃO. **Georreferenciamento e Geoprocessamento**. Portal Educação. Ago. 2013. Disponível em: <https://www.portaleducacao.com.br/informatica/artigos/51022/georreferenciamento-e-geoprocessamento>> Acesso em: 16 out. 2016.

PRINCÍPIOS BÁSICOS DE FOTOGRAMETRIA. Santa Catarina: UDESC - Universidade do Estado de Santa Catarina, FAED – Centro de Ciências Humanas e Educação. 2008. Disponível em: http://www.faed.udesc.br/arquivos/id_submenu/891/fotogrametria_material_04.pdf> Acesso em: 26 out. 2016.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento: Tecnologia Transdisciplinar**. Juiz de Fora: s.n., 2000.

SANTOS, Alexandre Rosa; **Noções Teóricas E Prática De Fotogrametria**. Capítulo 2. 2007. Disponível em: http://www.mundogeomatica.com.br/Fotogrametria/Livro_Fotogrametria/Capitulo2_Nocoos_Teoricas_Praticas_Fotogrametria.pdf. Acesso em: 23 ago. 2016.

SANTOS, Edipo Andre Wladeo. **Geração de Modelos Digitais de Elevação A Partir de Imagens Obtidas por Veículo Aéreo Não Tripulado**. 2016. 50f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia de Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SCHENK, Toni. Digital Aerial triangulation. **The International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences**. Viena, jul. 1996. p. 735-745. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.62.4887>> Acesso em: 23 out. 2016.

SEEBER, Günter. **Satellite Geodesy**. Hannover, Alemanha, 2003. Disponível em: <http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-seeber-g-satellite-geodesy-2003.pdf>> Acesso em: 03 out. 2016.

SIEBERT, Sebastian; TEIZER, Jochen. **Mobile 3D Mapping for Surveying Earthwork Projects Using na Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System**. Automation in Construction, Elsevier Journal, 31 jan. 2014. Disponível em: www.elsevier.com/locate/autcon. Acesso em: 13 jun. 2015.

SILVA, Alison G. de Oliveiral *et al.* **Métodos de levantamentos topográficos Planimétricos para o Georreferenciamento de Imóveis Rurais.** 1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal. Campo Grande – MS, 11-15 novembro, 2006. Disponível em: <<http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2006/12.12.13.39/doc/p111.pdf>> Acesso em: 7 Abr. 2016.

SISTEMA GALILEU DE EDUCAÇÃO ESTATÍSTICA. **Acurácia, Precisão e Exatidão.** Universidade de São Paulo (USP). São Paulo - SP. Disponível em: <http://www.galileu.esalq.usp.br/mostra_topico.php?cod=84> Acesso em 15 out. 2016.

SONY. **SVF14N13CXB Specifications.** 2016. Disponível em: <https://docs.sony.com/release//specs/SVF14N13CXB_mksp.pdf> Acesso em: 9 nov. 2016.

XMOBOTS. 2016 Disponível em: <http://www.xmrobots.com.br/index.php?sec=vants&funcao=ver_vant_echar> Acesso em: 11 nov. 2016.

ZAIDAN, T. Ricardo; **Fotointerpretação E Sensoriamento Remoto. Parte 1.** ICH/Departamento de Geociências – Universidade Estadual de São Paulo. Sorocaba. 2007. Disponível em: http://www2.sorocaba.unesp.br/professor/robertow/arquivos_2009/SR%202009_1/Apostila%20Foto.pdf. Acesso em: 03 mai. 2015

ZEISKE, Karl. **Simplificando o Levantamento Topográfico.** Leica Geosystems.36 p. Disponível em: <http://www.leica-geosystems.fr/downloads123/zz/general/general/brochures/Surveying_pt.pdf> Acesso em: 05 Ago. 2016.