

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

RAUL MAGNO NEVES DA SILVA

AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES COMPUTACIONAIS PARA O PROCESSAMENTO DE
DADOS PROVENIENTES DA TECNOLOGIA RPA: COMERCIAL VERSUS LIVRE

SALVADOR

2022

RAUL MAGNO NEVES DA SILVA

AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES COMPUTACIONAIS PARA O PROCESSAMENTO DE
DADOS PROVENIENTES DA TECNOLOGIA RPA: COMERCIAL VERSUS LIVRE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica.

Orientador: Prof. Msc. Fabiano Peixoto Freiman

SALVADOR

2022

TERMO DE APROVAÇÃO

RAUL MAGNO NEVES DA SILVA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, que me fortaleceu a cada dia e me trouxe tantas bênçãos. Dedico também à minha família que sempre me apoiou nos estudos e anseios profissionais, de forma mais direta a minha mãe Raildes, meu pai Luiz Magno, minha irmã Maildes, minha avó Alvanete, meu avô Raymundo, minha avó Dete e todos os meus tios e primos. Dedico também a Maria Beatriz, meu amor que esteve presente e tanto me ajudou nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir vivenciar todas as experiências que me trouxeram até este momento. Agradeço à minha família, minha mãe Raildes, meu pai Luiz Magno, minha irmã Maildes, minha avó Alvanete, meu avô Raymundo, minha avó Dete e meus tios que me formaram e me ajudaram tanto nesta jornada.

A Maria Beatriz, minha parceira de vida, de curso e de trabalhos que me apoiou durante a elaboração deste trabalho e acolheu as minhas dificuldades.

Ao professor Msc. Fabiano Freiman por todos os ensinamentos, pelas dicas, puxões de orelha, idas a campo e pela paciência nos momentos em que o trabalho progrediu de forma mais lenta.

À professora Dra. Fernanda Puga, que me orientou na Iniciação Científica que tanto agregou na minha formação.

Ao professor Dr. Artur Caldas e a professora Msc. Suzana Daniela que me auxiliaram na aquisição de parte dos dados desta pesquisa na cidade de Aracaju.

Ao professor Dr. Júlio Pedrassoli, por emprestar um RPA para adquirir dados que foram utilizados preliminarmente.

À professora Msc Fabíola Andrade, que me orientou no projeto de pesquisa da SPU e transmitiu diversos conhecimentos em muitas disciplinas.

Ao professor Dr. Michael Heimer, pelos conhecimentos transmitidos e pelos incentivos a entregar o melhor possível.

A Leonardo Dias, que me ajudou diretamente em diversas atividades deste trabalho e em outros ao longo da graduação.

À Lorena Nizama, pelas dicas que me ajudaram neste trabalho e pela parceria nas demais disciplinas.

Aos meus amigos que conheci na UFBA, me ajudaram neste processo e levarei para a vida: Misael Bispo, Luana Lyra, Gabriele Lisboa, Sofia Sinoti, Ítalo Tavares, Yuri Matheus, Ana, Josuel e Janaína.

A Elmo Bispo que cedeu gentilmente os dados do seu trabalho de conclusão de curso.

A Jorge Silveira, que me auxiliou na coleta dos dados em Aracaju e que contribuiu com ideias.

A Roberto Victor, que me auxiliou na aquisição de dados em Salvador e tanto ajudou com suas dicas.

À Ina Maria, que sempre me ajudou com ideias e com a motivação.

A Carlos Galassi que se dispôs a processar os dados na OCA Drones.

A José Eduardo Gonçalves do SIMEPAR, que cedeu um conjunto de dados que foi utilizado em etapa preliminar.

A Camila Balducci, que me ajudou imensamente na elaboração deste trabalho.

Aos técnicos da prefeitura de Aracaju que nos auxiliaram na aquisição dos dados, em especial ao Júlio.

Aos amigos que fiz no INEMA, e enriqueceram muito a minha construção profissional.

Ao pessoal da SPU, que trouxe novos conhecimentos principalmente na área de conversão e adaptação de dados históricos.

A todos os colaboradores da Ambiente Sustentável, lugar que me proporcionou grande crescimento profissional e pessoal e onde me sinto em casa desde o primeiro dia.

A todos os colegas de curso, que foram importantes na evolução das disciplinas.

A todos os professores do Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia, que contribuíram diretamente para a minha construção profissional.

Por último, agradeço a todos os professores que participaram da minha formação desde o pré-escolar até o presente momento.

RESUMO

Aeronaves Remotamente Pilotadas, do termo em inglês *Remotely Piloted Aircraft System* (RPA) têm sido empregadas na aquisição de dados de base para construção de mapas e modelos 3D. Estes equipamentos permitem elaborar de forma célere dados com resoluções suficientes para trabalhos práticos, análises e pesquisas. Suas aplicações não se limitam a uma única finalidade. Por exemplo, no contexto cartográfico, as RPAs podem ser consideradas como ferramentas auxiliares para um processo de atualização de uma cartografia de base, no contexto ambiental podem ser utilizados para identificar as restrições ambientais de uma região e na seara da mineração podem ser utilizados para estimar o volume de pilhas de minérios. A etapa de processamento dos dados é uma atividade inerente a este tipo de trabalho, e por este motivo, diversas soluções computacionais foram criadas com essa finalidade sendo a maior parte delas comerciais. Isto cria uma barreira inicial de acesso a este método de aquisição de dados, pois nem sempre é viável adquirir a licença destes *softwares*. Buscando suprir esta demanda, algumas soluções da iniciativa *open source* foram desenvolvidas e estão disponíveis para serem utilizadas sem a obrigatoriedade da compra de uma licença. O objetivo deste trabalho foi comparar a qualidade posicional de ortofotos geradas a partir da aplicação de soluções computacionais livre (WebODM) e comerciais (Agisoft Metashape e PIX4Dmapper). Para tal, foram consideradas 2 áreas de estudo com diferentes características de relevo, uma em Aracaju (A) e uma em Salvador (B). O tempo de processamento nas 3 soluções foi computado e o Metashape apresentou os maiores tempos de trabalho, as ortofotos foram classificadas de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) onde as 3 ortofotos obtiveram padronização classe A na escala 1:1.000 na área de estudo A, e na área de estudo B o Metashape e o PIX4D obtiveram padrão classe A na escala 1:5.000 enquanto o software livre obteve classe A na escala 1:10.000. Outro resultado foi a comparação estatística t-Student pareado entre as discrepâncias dos softwares comerciais em relação ao livre, o que demonstrou que na área de estudo A os erros avaliados se mostraram maiores no WebODM que nos demais a um nível de confiança de 95% e na área B não houve indicação estatística que validasse esta hipótese. Desta forma, concluiu-se que apesar de apresentar resultados inferiores aos seus pares comerciais, o WebODM se mostrou capaz de ser utilizado para aplicações diversas que demandem menor acurácia posicional ou para fins acadêmicos.

Palavras-chave: Fotogrametria. RPA. Processamento. Software Livre. Structure-from-Motion. Ortofoto.

ABSTRACT

Remotely Piloted Aircraft (RPAs) have been used in the acquisition of base data for building maps and 3D models. These devices allow preparing notoriously data with sufficient resolution for practical work, analysis, and research. Its applications are not limited to a single purpose. For example, in the cartographic context, RPAs can be considered as auxiliary tools for a process of updating a base cartography, in the environmental context they can be used to identify the environmental restrictions of a region and in the mining area they can be used to estimate the volume of ore piles. The data processing step is an activity inherent to this type of work, and for this reason, several computational solutions were created for this purpose, most of them with commercial characteristics. This creates an initial hurdle to accessing this method of data acquisition, as it is not always feasible to acquire a license for those softwares. Pursuing to accomplish this demand, some solutions from the open source initiative were developed and are available to be used without the necessity to purchase a license. The objective of this research was to compare the quality of orthophotos generated from application of free (OpenDroneMap) and commercial (Agisoft Metashape and PIX4Dmapper) computational solutions. For this, 2 study areas with different (land) relief characteristics were considered, one in Aracaju (A) and one in Salvador (B). The total processing time in the 3 solutions was computed and Metashape showed the highest times; the orthophotos were classified according to the PEC-PCD, where the 3 orthophotos obtained class A standardization, on a scale of 1:1,000 in study area A. In study area B, Metashape and PIX4D obtained a class A standard on scale 1:5,000, while the software free got a class A at a scale of 1:10,000. Another result was the statistical comparison (paired t-Student) between the discrepancies of commercial software in relation to the software free, which demonstrated that in study area A the errors evaluated were higher in WebODM than in the others, at a significance level of 95%, and in area B there was no statistical significance that would indicate this hypothesis. Thus, it was concluded that despite presenting lower results than its commercial peers, WebODM proved capacity of being used for different purposes in flat relief regions, for applications that demand less positional accuracy or for academic purposes in undulating regions.

Keywords: Photogrammetry. UAV. UAV Processing. Open Source. Orthophoto.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PROJETO FOTOGRAMÉTRICO.....	23
FIGURA 2 – DIMENSÕES DO ESPAÇO.....	24
FIGURA 3 – PAR ESTEREOSCÓPICO.....	25
FIGURA 4 – CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE.....	26
FIGURA 5 – MOVIMENTO DA CÂMERA.....	28
FIGURA 6 – FLUXOGRAMA DO PROCESSAMENTO SFM.....	29
FIGURA 7 – TIPOS DE OPERAÇÃO DE RPAS.....	31
FIGURA 8 – RESUMO DAS EXIGÊNCIAS DA ANAC.....	32
FIGURA 9 – MODELOS DE RPA.....	34
FIGURA 10 – EXEMPLO DE PLANO DE VOO NO APP DRONE DEPLOY.....	36
FIGURA 11 – FLUXOGRAMA METODOLÓGICO.....	45
FIGURA 12 – ÁREA DE ESTUDO a) ARACAJU b) ESCOLA POLITÉCNICA.....	45
FIGURA 13 – IMAGENS DA AQUISIÇÃO DOS DADOS DA ÁREA A.....	47
FIGURA 14 – IMAGENS DA AQUISIÇÃO DE PARTE DOS DADOS DA ÁREA B....	47
FIGURA 15 – PONTOS DE CONTROLE E CHECAGEM NA ÁREA A.....	48
FIGURA 16 – PONTOS DE CONTROLE E CHECAGEM NA ÁREA B.....	49
FIGURA 17 – IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE - METASHAPE....	51
FIGURA 18 – IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE - PIX4DMAPPER	53
FIGURA 19 – PONTOS DE CONTROLE E CHECAGEM NA ÁREA B.....	54
FIGURA 20 – REDIMENSIONAMENTO DAS IMAGENS DA ÁREA A.....	55
FIGURA 21 – REDIMENSIONAMENTO DAS IMAGENS DA ÁREA B.....	55
FIGURA 22 – ÁREA DE ESTUDO A – AGISOFT METASHAPE.....	58
FIGURA 23 – ÁREA DE ESTUDO A - PIX4DMAPPER.....	59
FIGURA 24 – ÁREA DE ESTUDO A - WEBODM.....	59
FIGURA 25 – ÁREA DE ESTUDO B – AGISOFT METASHAPE.....	60
FIGURA 26 – ÁREA DE ESTUDO B – PIX4DMAPPER.....	60
FIGURA 27– ÁREA DE ESTUDO B – WEBODM.....	61
FIGURA 28 – COMPARAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO A.....	62
FIGURA 29 – COMPARAÇÃO 1 DA ÁREA DE ESTUDO A.....	62
FIGURA 30 – COMPARAÇÃO 2 DA ÁREA DE ESTUDO A.....	63
FIGURA 31 – COMPARAÇÃO 3 DA ÁREA DE ESTUDO A.....	63

FIGURA 32 – COMPARAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO B.....	64
FIGURA 33 – COMPARAÇÃO 1 DA ÁREA DE ESTUDO B.....	64
FIGURA 34 – COMPARAÇÃO 2 DA ÁREA DE ESTUDO B.....	65
FIGURA 35 – COMPARAÇÃO 3 DA ÁREA DE ESTUDO B.....	65

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – PUBLICAÇÕES COM O TERMO-CHAVE.....	18
GRÁFICO 2 – CURVA DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL PADRÃO.....	43
GRÁFICO 3 – TEMPO DE PROCESSAMENTO.....	57
GRÁFICO 4 – DISCREPÂNCIAS HORIZONTAIS NA ÁREA A (METROS).....	68
GRÁFICO 5 – DISCREPÂNCIAS HORIZONTAIS NA ÁREA B (METROS).....	69
GRÁFICO 6 – <i>BOX-PLOT</i> WEBODM X METASHAPE NA ÁREA DE ESTUDO A....	71
GRÁFICO 7 – <i>BOX-PLOT</i> WEBODM X METASHAPE NA ÁREA DE ESTUDO B....	72
GRÁFICO 8 – <i>BOX-PLOT</i> WEBODM X PIX4D NA ÁREA DE ESTUDO A.....	73
GRÁFICO 9 – <i>BOX-PLOT</i> WEBODM X PIX4D NA ÁREA DE ESTUDO B.....	74

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – APLICAÇÕES DA FOTOGRAMETRIA COM O USO DE RPA.....	35
QUADRO 2 – APLICATIVOS DE PLANEJAMENTO DE VOO.....	36
QUADRO 3 – MATERIAIS EMPREGADOS NA AQUISIÇÃO DE DADOS.....	46
QUADRO 4 – CONFIGURAÇÃO DE VOO.....	50
QUADRO 5 – FLUXO DE TRABALHO DO AGISOFT METASHAPE.....	51
QUADRO 6 – <i>TEMPLATES</i> DO PIX4D.....	52
QUADRO 7 – ORTOFOTOS.....	58
QUADRO 8 – RESULTADO DE TESTES ESTATÍSTICOS E PEC-PCD.....	69
QUADRO 9 – COMPARAÇÕES ENTRE AS DISCREPÂNCIAS.....	70
QUADRO 10 – TESTES DE HIPÓTESES.....	74

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PREÇOS DOS SOFTWARES.....	19
TABELA 2 – PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA (PEC).....	41
TABELA 3 – PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS (PEC-PCD).....	42
TABELA 4 – COORDENADAS DOS VÉRTICES DA ÁREA A.....	48
TABELA 5 – COORDENADAS DOS VÉRTICES DA ÁREA B.....	49
TABELA 6 – GSD DAS ORTOFOTOS GERADAS PELOS SOFTWARES.....	57
TABELA 7 – DISCREPÂNCIAS (m) NA ÁREA A – AGISOFT METASHAPE.....	66
TABELA 8 – DISCREPÂNCIAS (m) NA ÁREA A – PIX4DMAPPER.....	66
TABELA 9 – DISCREPÂNCIAS (m) NA ÁREA A – WEBODM.....	67
TABELA 10 – DISCREPÂNCIAS (m) NA ÁREA B – AGISOFT METASHAPE.....	67
TABELA 11 – DISCREPÂNCIAS (m) NA ÁREA B – PIX4DMAPPER.....	67
TABELA 12 – DISCREPÂNCIAS (m) NA ÁREA B – WEBODM.....	67
TABELA 13 – ESTATÍSTICA WEBODM X METASHAPE NA ÁREA A.....	70
TABELA 14 – ESTATÍSTICA WEBODM X METASHAPE NA ÁREA B.....	71
TABELA 15 – ESTATÍSTICA WEBODM X PIX4D NA ÁREA A.....	72
TABELA 16 – ESTATÍSTICA WEBODM X PIX4D NA ÁREA B.....	73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 JUSTIFICATIVA.....	18
1.2 OBJETIVOS.....	21
1.2.1 Objetivo geral.....	21
1.2.2 Objetivos específicos.....	21
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1 FOTOGRAMETRIA DIGITAL.....	22
2.1.1 Aspectos gerais da Fotogrametria.....	24
ESPAÇO-IMAGEM.....	26
ESPAÇO-OBJETO.....	26
2.2 STRUCTURE-FROM-MOTION.....	28
2.3 RPAS E VOOS AUTOMATIZADOS.....	30
2.3.1 Legislação Aplicável às RPAs.....	30
2.3.2 Modelos de RPA.....	33
2.3.3 Softwares de planejamento de voo.....	35
2.4 PRINCIPAIS SOLUÇÕES COMERCIAIS DE PROCESSAMENTO.....	36
2.4.1 Agisoft Metashape.....	37
2.4.2 PIX4D.....	37
2.5 SOFTWARES LIVRES.....	37
2.6 OPEN DRONE MAP.....	38
2.6.1 Origem do Software Open Drone Map.....	38
2.6.2 Versões do ODM.....	39
2.7 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE DADOS GEOESPACIAIS.....	40
2.7.1 Decreto nº 89.817/1984, ET-ADGV e PEC-PCD.....	41
2.7.2 Avaliações Estatísticas.....	42
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1 ÁREAS DE ESTUDO.....	45
3.2 MATERIAIS.....	46
3.3 MÉTODOS.....	46
3.3.1 Aquisição de dados <i>in loco</i>	46
3.3.2 Processamento.....	50

3.3.2.1 Agisoft Metashape 1.9.16.4.....	50
3.3.2.2 PIX4Dmapper 4.7.5.....	52
3.3.2.3 WebODM 1.9.6.....	53
3.3.3 Identificação dos pontos homólogos.....	56
3.3.4 Avaliação posicional.....	56
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	56
4.1 TEMPOS DE PROCESSAMENTO E GSD.....	56
4.2 ORTOFOTOS GERADAS.....	58
4.3 ACURÁCIA POSICIONAL.....	66
4.4 TESTES DE HIPÓTESES.....	70
4.4.1 WebODM x Agisoft Metashape.....	70
4.4.2 WebODM x PIX4D.....	72
4.4.3 Panorama dos testes de hipóteses.....	74
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
5.1 DIFICULDADES ENCONTRADAS.....	77
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77
REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

A Fotogrametria é a ciência e tecnologia que permite, a partir de sensores passivos e/ou ativos, reconstruir tridimensionalmente objetos e/ou espaços geográficos, a depender da plataforma empregada, sem o contato físico direto entre o sensor e o objeto ou alvo de interesse. Inicialmente, utilizava-se ferramentas, técnicas e cálculos analógicos para implementar os seus conceitos e gerar produtos fotogramétricos (COELHO; BRITO, 2007). Entretanto, com a criação dos computadores, a miniaturização de componentes eletrônicos e seu barateamento provocaram o avanço tecnológico e desenvolvimento de novos processos analíticos e práticos.

Recentemente, Aeronaves Remotamente Pilotadas, do termo em inglês *Remotely Piloted Aircraft System* (RPA) são empregadas na aquisição de dados de base para construção de mapas e modelos 3D (JÚNIOR; RUFINO, 2015). São ferramentas que podem fornecer rapidamente dados com resoluções suficientes para trabalhos práticos, análises e pesquisa. No contexto cartográfico, podem ser considerados como ferramentas auxiliares para um processo de atualização de uma cartografia de base, levando em consideração as suas limitações de precisão (PLICHTA; MICHAŁ; WYCZAŁEK, 2017). Com componentes monetariamente acessíveis, a RPA contribui para o barateamento dos processos fotogramétricos e abriu oportunidades de inovação quando comparado com soluções usuais, que necessitam de equipamentos robustos e caros.

Estas RPAs são equipadas com um conjunto de sensores. O principal deles é a câmera, que registra a luz visível na forma de fotografia digital, fornecendo produtos de qualidade obtidos a partir do processamento de dados brutos em softwares fotogramétricos, ou de visão computacional, específicos que permitem transformar um conjunto de fotografias com níveis de sobreposições para realizar a construção de representações e modelos 3D.

Internacionalmente, classifica-se estes aplicativos de processamento em duas classes: 1) gratuitos (tendência criada pela Fundação para o *Software* Livre (FSF, *Free Software Foundation*) e; 2) comerciais. Cada grupo de classificação apresenta vantagens e desvantagens de acordo com o processo de implementação e limitações associadas a eles, as quais devem ser avaliadas a partir de listas

objetivas considerando fatores específicos importantes para a concepção de qualidade da metodologia empregada e construção de um produto em particular.

As etapas previstas em ambos os grupos para a compilação de um produto fotogramétrico geralmente são semelhantes e permitem a transformação de fotos em produtos geoespaciais 3D. Primeiramente, captura-se imagens com configuração compatível com a necessidade do trabalho. A partir do conjunto de imagens, busca-se um software específico para processá-las e extrair informações tridimensionais do conjunto a nível topográfico local ou global a depender da aplicação e dos sensores empregados.

Os softwares têm um papel importante e são dotados de algoritmos computacionais que determinam automaticamente correspondências entre pontos homólogos, reconstrução de modelos e determinação de parâmetros de Orientação Interior (OI), reconstrução de uma nuvem de pontos esparsa e estimativa de parâmetros da Orientação Exterior (OE). Posteriormente, aplica-se o processo de aerotriangulação que é a determinação de posições no espaço de um conjunto de elementos. Por fim, pode-se obter produtos fotogramétricos finais como ortofotos, Modelos Digitais de Terreno (MDT) e de Superfície (MDS).

Devido a crescente utilização de dados fotogramétricos provenientes de RPAs e a disponibilidade de diferentes softwares para processamento, este trabalho consiste na comparação dos resultados obtidos em programas livres e comerciais disponíveis no mercado para processar imagens de RPA. Essa comparação foi realizada levando em conta aspectos da compilação do software propriamente dito, associados a configuração de aquisição de dados brutos *in loco* e da área mapeada. Os programas computacionais comerciais empregados foram: PIX4dmapper na versão 4.7.5 e Agisoft Metashape na versão 1.8.4. O software *Open Drone Map* na versão WebODM 1.9.16 foi empregado como solução de software livre.

Este trabalho é composto por 5 Capítulos. No primeiro Capítulo são apresentados o tema a ser discutido, a definição do problema e a apresentação dos objetivos geral e específicos. No segundo Capítulo, são apresentados o levantamento e a descrição dos principais conceitos relacionados ao estudo. No terceiro Capítulo são descritos o método proposto e os materiais utilizados na avaliação do processamento dos diferentes programas. No quarto Capítulo são

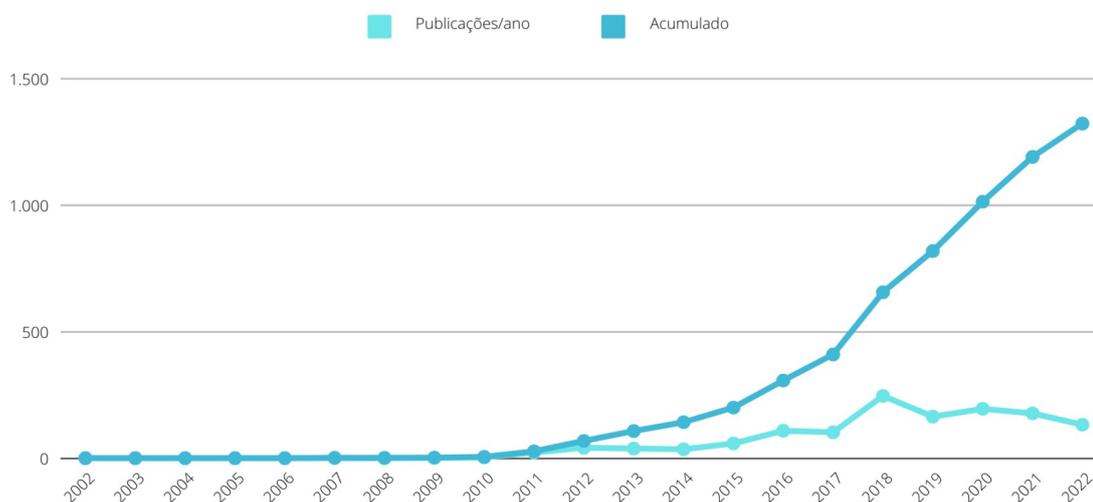
apresentadas as discussões relacionadas aos resultados obtidos. No quinto e último Capítulo são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em uma pesquisa bibliográfica no portal de periódicos da CAPES, utilizando o termo-chave “*Unmanned Aerial Vehicles*” (sinônimo de RPA, no inglês), encontrou-se um total de 69.717 trabalhos desenvolvidos nos últimos 20 anos (entre 2002 e 2022). Buscando de uma forma mais específica, o termo “*UAV Photogrammetry*” resultou em 4.410 itens que correlacionam as RPAs e suas aplicações. Refinando ainda mais as buscas, empregou-se o termo-chave “*Photogrammetry Processing UAV*”, retornando um valor específico de 1.323 desenvolvimentos.

No GRÁFICO 1, apresenta-se graficamente o crescimento e desenvolvimento das pesquisas relacionadas ao tema para a busca que emprega como termo chave “*Photogrammetry Processing UAV*”.

GRÁFICO 1 – PUBLICAÇÕES COM O TERMO-CHAVE



FONTE: O autor (2022).

Observa-se que em 2007, os resultados demonstram um valor total de uma publicação, que cresce em decorrência dos desenvolvimentos e minimização de custos dos componentes eletrônicos, tendo uma popularização da tecnologia e crescimento acumulado de 132.300% nas pesquisas relacionadas ao emprego ou desenvolvimento de aplicações computacionais relacionadas aos dados

provenientes de RPAs em um intervalo de 15 anos. No contexto prático e profissional não é diferente. A tecnologia é empregada para diversas finalidades, desde o mapeamento (AMORIM, 2020) até aspectos de monitoramento ambiental (CAMPOS, 2021) ou estrutural (SANTOS, 2021). Com a crescente demanda houve um aumento na procura por *softwares* que possibilitem o processamento automatizado dos dados. Neste contexto, *softwares* como PIX4Dmapper, Agisoft Metashape, Drone Deploy e SimActive Correlator 3D ganharam espaço no mercado como soluções comerciais empregadas para a obtenção de produtos fotogramétricos.

O uso de RPAs e essas soluções computacionais mencionadas representam uma redução de custos significativa quando comparada à fotogrametria tradicional (FRANCO; NAIME, 2021). Entretanto, a compra da licença de tais *softwares* comerciais se mostra onerosa aos profissionais autônomos, pesquisadores e pequenas empresas. Neste cenário, os programas de iniciativa dos *softwares* livres representam a possibilidade de universalização destas aplicações e reduz os obstáculos na implementação do ensino e pesquisa voltados à fotogrametria aplicada com RPAs.

Para efeito de comparação, foi levantado nos *sites* das principais fornecedoras de soluções de processamento os preços adotados para a compra em definitivo (fixa) e em formato de mensalidade (que expira após o tempo de uso comprado) (TABELA 1).

TABELA 1 – PREÇOS DOS SOFTWARES

Software	Mensalidade (dólares)	Licença fixa (dólares)
PIX4Dmapper	\$ 291,67	\$ 4.990,00
Agisoft Metashape	Não se aplica	\$ 3.499,00
SimActive Correlator 3D	\$ 245,83	\$ 5.900,00
Drone Deploy	\$ 329,00	Não se aplica
Open Drone Map	Não se aplica	\$ 0,00 / \$ 57,00

FONTE: O autor (09/11/2022).

Ao observar os custos orçados na TABELA 1, nota-se que a mensalidade adotada pelas soluções comerciais gira em torno de 300 dólares e o investimento para a compra da licença fixa varia entre 3500 e 5900 dólares, fator que pode inviabilizar a aplicação da tecnologia. Todavia, o *software* Open Drone Map (WebODM) pode ser instalado de forma gratuita com o uso de alguns programas

acessórios ou através da compra de uma licença com investimento de 57,00 dólares.

Devido a grande variabilidade, a implementação das técnicas de processamento varia de *software* para *software*. Cada empresa segue uma linha de desenvolvimento, o que traz singularidades em cada um dos programas. O resultado das diferentes implementações é que um mesmo conjunto de dados, as imagens coletadas, pode gerar produtos com parâmetros, características e qualidades diferentes de acordo com a solução escolhida. Outra implicação da existência de diferentes aplicativos é que cada um deles tem uma relação com o hardware de processamento de forma independente, por exemplo o *software* hipotético X pode depender de uma maior quantidade de memória RAM, enquanto o *software* hipotético Y lida melhor com a RAM e demanda uma placa gráfica mais potente.

Na literatura, foram encontrados 2 trabalhos com a avaliação de diferentes softwares: (DUARTE, 2022) que comparou o resultado do processamento de um voo fotogramétrico com o uso de RPA de asa fixa utilizando o WebODM, Agisoft Photoscan e o PIX4Dmapper; e o trabalho de (PELL; LI; JOYCE, 2022) que analisou e comparou 4 softwares (Agisoft Metashape, Correlator 3D, PIX4Dmapper e WebODM) em 5 áreas de estudo.

A escolha do programa de processamento a ser utilizado em determinado projeto é um momento crucial do planejamento do mesmo. Todos os fatores, incluindo tempo de processamento, hardware necessário, custo do *software*, tamanho da área mapeada e parâmetros do produto esperado influenciam diretamente na decisão tomada. Por este fato, busca-se neste trabalho responder ao seguinte questionamento: 1) Existem diferenças nos produtos fotogramétricos adquiridos com RPAs e processados por softwares livre e comerciais?

Para responder este questionamento, os objetivos geral e específicos foram definidos, conforme listado na Subseção 1.2.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Comparar a qualidade posicional de ortofotos geradas a partir da aplicação de soluções computacionais livre (OpenDroneMap) e comerciais (PIX4D e Agisoft Metashape) para o processamento de dados provenientes da tecnologia RPA.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral da pesquisa, definem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Adquirir conjuntos de dados aerofotogramétricos *in loco* com uso de RPAs;
- b) Adquirir pontos de controle e checagem *in loco* com a tecnologia GNSS;
- c) Processar os conjuntos de dados adquiridos no item (a) utilizando *softwares* comerciais e o programa livre para a confecção de ortofotos;
- d) Quantificar e comparar o tempo de processamento nos diferentes softwares;
- e) Avaliar isoladamente a qualidade das ortofotos geradas nos diferentes *softwares* de forma quantitativa (PEC-PCD e teste de tendência);
- f) Analisar estatisticamente (t-student para amostras pareadas) ambos os resultados encontrados no item (c);

2 REVISÃO DE LITERATURA

O objetivo deste Capítulo é a apresentar os conceitos teóricos relacionados a temática do trabalho. Inicialmente, apresenta-se conceitos relacionados à Fotogrametria Digital e às técnicas de determinação de coordenadas no espaço objeto, passando por sua aplicação com o uso de RPAs, softwares de processamento e as técnicas de controle de qualidade de produtos fotogramétricos no contexto digital.

2.1 FOTOGRAMETRIA DIGITAL

Segundo a *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ISPRS) o principal objetivo da Fotogrametria é obter informações confiáveis sobre a Terra, seu meio ambiente, outros objetos físicos e processos com o uso de sensores imageadores através de gravação, medição, análise e representação. Anteriormente, realizava-se a aquisição e compilação de produtos fotogramétricos de forma analógica, entretanto, com a concepção de computadores e softwares de processamento, surgiu, nos anos 80, a Fotogrametria Digital. A principal novidade foi a utilização de dados digitais como fonte primária, sejam imagens analógicas escaneadas ou aquelas adquiridas com sensores digitais (COELHO; BRITO, 2007).

Com o avanço da computação, processos analíticos foram implementados e soluções tecnológicas eficientes disponibilizadas no mercado para o contexto da Fotogrametria Tradicional (métrica), como soluções para calibrações de câmera (DEBIASI; HAINOSZ; MITISHITA, 2012), orientações (ESPINHOSA, 2008), aerotriangulação (PERES, 2007), bundle adjustment (CHOW; LICHTI, 2013) e outros desenvolvimentos usados atualmente na Fotogrametria moderna.

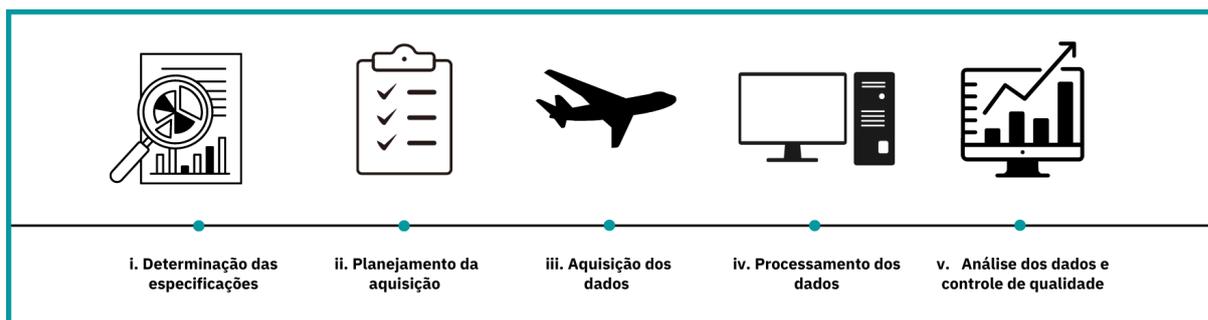
Assim como na Fotogrametria Clássica, a partir desses processos aplicados sobre dados fotogramétricos digitais é possível a realização de medições 3D, sem contato direto entre objeto mapeado e sensor, baseado em inúmeras imagens que permitem a estimativa de informações semânticas e métricas de objetos, sejam em perspectivas aéreas ou terrestres. As técnicas tradicionais de captação de imagens fotogramétricas são baseadas no princípio da triangulação, ou seja, que o ponto de vista de, pelo menos, duas fotografias tiradas em localizações diferentes se juntam em um ponto comum a partir da interseção de pontos homólogos que permitem a determinação da localização tridimensional (COELHO; BRITO, 2007).

A Visão Computacional (VC) também contribuiu para os avanços dessa nova tecnologia digital, passando de uma aplicação centrada no mapeamento com o emprego de plataformas aéreas para aplicações variadas como o emprego da Fotogrametria Terrestre. Algoritmos como o *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT) (ZHANG; CHEN; JIA, 2017), o *Random Sample Consensus* (RANSAC) (DERPANIS, 2010) e o *Structure From Motion* (SFM) (SCHONBERGER; FRAHM, 2016) são algoritmos importantes dessa nova fase e construção de aspectos

teóricos relacionados a essa ciência. Principalmente empregando novas tecnologias e plataformas de mapeamento como as RPA. Esses novos desenvolvimentos trouxeram a popularização da Fotogrametria a partir do barateamento e miniaturização dos componentes que possibilitaram a inserção de um conjunto de sensores de baixo custo em pequenos sistemas de mapeamento.

Independente da aplicação e da plataforma empregada, a aquisição de imagens brutas de base para um projeto fotogramétrico deve ser realizada através de um projeto fotogramétrico que é o conjunto de ações, etapas e procedimentos que possibilitam a geração dos produtos oriundos da Fotogrametria. Para tal objetivo, o projeto é dividido em etapas igualmente importantes e determinantes na qualidade dos resultados, conforme FIGURA 1.

FIGURA 1 – PROJETO FOTOGAMÉTRICO



FONTE: O autor (2022).

Em que:

- i. Determinação das especificações: acurácia esperada, plataforma de aquisição, área a ser mapeada, escolha dos equipamentos embarcados, determinação do *Ground Sample Distance* (GSD) esperado.
- ii. Planejamento da aquisição: determinação dos parâmetros do plano de voo como sobreposição longitudinal e lateral, altitude de voo, posicionamento dos pontos de controle e de checagem, determinação da data do voo, solicitação de anuências e aprovações dos órgãos de controle aéreo.
- iii. Aquisição dos dados: a realização do voo com a coleta das imagens, o processo de aquisição dos pontos de controle e de checagem, bem como as demais atividades de reambulação.

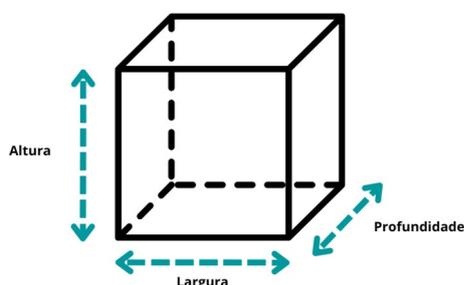
- iv. Processamento dos dados obtidos: nesta etapa, tem-se como produtos iniciais um conjunto de imagens em perspectiva cônica e após um conjunto de procedimentos tem-se como produto a modelagem digital tridimensional de elevação (MDE), uma imagem em perspectiva ortogonal e retificada conhecida como ortofoto e um arquivo vetorial de feições relevantes da região.
- v. Análise dos dados e controle de qualidade: ao final de todo o processo, os produtos são avaliados tanto quantitativamente quanto qualitativamente, através de procedimentos como os recomendados pela Especificação Técnica de Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG), para o caso de construção de ortofotos

A seguir são apresentados os aspectos gerais da Fotogrametria e suas aplicações na aquisição de imagens com sistemas RPA.

2.1.1 Aspectos gerais da Fotogrametria

Na física clássica, é considerada como uma modelagem da realidade o conceito da tridimensionalidade, ou seja, o espaço em que o ser humano está inserido é composto por 3 grandezas distintas: largura, comprimento e profundidade (FIGURA 2). Tais grandezas podem ser representadas com o uso de sistemas cartesianos com o uso de 3 eixos fundamentais: X, Y e Z.

FIGURA 2 – DIMENSÕES DO ESPAÇO



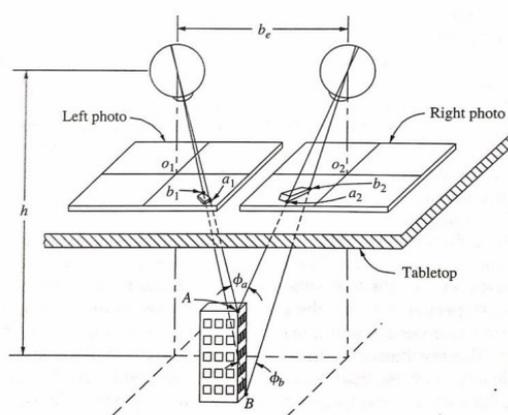
FONTE: O autor (2022).

Apesar da natureza tridimensional da realidade, o ser humano depende do uso simultâneo dos dois olhos para perceber todas as dimensões. Isso acontece

pois cada olho do observador capta somente uma imagem bidimensional, onde é percebida a largura e a altura do objeto visualizado. Como os olhos estão em posições diferentes do espaço, ao fundir as duas imagens visualizadas o cérebro consegue identificar a dimensão da profundidade. Esse processo de identificação de 3 dimensões a partir do par de imagens captada pelos olhos é possível graças a estereoscopia humana (COELHO; BRITO, 2007).

Segundo MENDES, a mesma lógica é aplicada na Fotogrametria, pois ela faz uso da estereoscopia para simular o processo realizado com o olho através de imagens que são chamadas de pares estereoscópicos.

FIGURA 3 – PAR ESTEREOSCÓPICO



FONTE: Wolf, Dewitt e Wilkinson (2014).

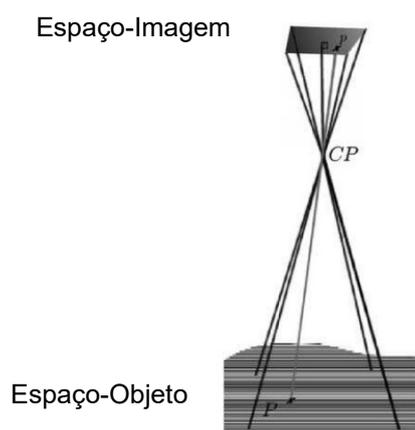
Já a Paralaxe Estereoscópica é conceituada pelo deslocamento aparente de um objeto ao comparar 2 imagens, tal movimentação é causada pela mudança do ponto de observação. Tal conceito é importante na fotogrametria pois por intermédio desta abstração, é possível determinar a diferença de nível entre 2 ou mais pontos. (COELHO; BRITO, 2007).

Para determinar as 3 dimensões na Fotogrametria, deve-se realizar alguns procedimentos, como por exemplo a OI e OE. O primeiro consiste na reconstrução do feixe perspectivo, ou seja, o referenciamento da imagem em relação à câmara (COELHO; BRITO, 2007). Isso se faz necessário pois, além de guardar distorções inerentes à câmara, os arquivos digitais das imagens não têm referência métrica alguma, tendo seu comprimento e largura segmentados em pixels.

A OI, portanto, refere-se ao procedimento de conversão do sistema de coordenadas em pixels para o sistema métrico (mm). Essa conversão é feita através de modelos matemáticos e se fazem necessários os parâmetros de calibração da câmera (distância focal, as coordenadas do ponto principal e os parâmetros de correção das distorções das lentes) (SILVA et al., 2022). A OE, por sua vez, é o processo que tem como objetivo a determinação da posição (X_0 , Y_0 e Z_0) e dos ângulos de orientação do sensor (Φ , ω e κ) no momento da coleta de cada imagem do bloco em relação ao referencial considerado para o espaço-objeto e ao espaço-imagem respectivamente (COELHO; BRITO, 2007).

Tanto a determinação da OI e OE são etapas importantes e preliminares para a determinação das coordenadas cartesianas do espaço-objeto (X , Y e Z) de pontos por meio das relações geométricas entre as imagens é usualmente chamada de aerotriangulação, contudo, por abranger também o contexto da Fotogrametria Terrestre o termo fototriangulação se mostra mais abrangente (MENDES PITOMBEIRA; ADERSON DOS REIS FILHO, 2020). Esse processo é baseado no conceito de colinearidade entre o Centro Perspectivo (CP) da imagem, o objeto observado no Espaço-imagem (EI) e o objeto no Espaço-objeto (EO), conforme ilustrado na FIGURA 4.

FIGURA 4 – CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE



FONTE: Coelho e Brito (2009).

A análise dos elementos contidos nas imagens através desta perspectiva permite formular as duas Equações de Colinearidade (EQUAÇÕES 1.1 e 1.2), que relacionam as coordenadas do ponto em questão na imagem, no espaço objeto, as

coordenadas do centro perspectivo da câmera e os ângulos de atitude no momento da tomada da foto (COELHO; BRITO, 2007).

$$x = x_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (1.1)$$

$$y = y_0 - f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (1.2)$$

Sendo:

x e y : Coordenadas do espaço imagem;

x_0 e y_0 : Coordenadas do ponto principal;

f : Distância focal da câmera;

r_{11}, \dots, r_{33} : Elementos da matriz de rotação, formados pelos ângulos de atitude.

X, Y e Z : Coordenadas do espaço objeto;

X_0, Y_0 e Z_0 : Coordenadas do centro perspectivo (O) medidas no sistema de referência do espaço objeto;

A Fototriangulação Analítica, que é realizada totalmente através de modelos matemáticos não-analógicos, pode ser implementada de 2 principais formas: com a fototriangulação em bloco por feixes perspectivos (que determina de forma simultânea os 6 parâmetros de orientação exterior de cada tomada e as coordenadas tridimensionais dos pontos analisados) ou através de duas etapas chamadas de ressecção espacial, em que são determinados os parâmetros de OE; e interseção espacial que permite estimar as coordenadas tridimensionais dos pontos analisados (COELHO; BRITO, 2007). Em ambos casos, o conceito de colinearidade é utilizado como premissa para a elaboração das equações e modelos matemáticos aplicados.

Quando emprega-se o processo de georreferenciamento direto, a determinação de coordenadas é facilitada, pois, com o auxílio de um conjunto de sensores (GNSS e INS, principalmente) é possível a determinação direta dos parâmetros de OE. No processo indireto é necessário a aquisição de dados *in loco* para relacionar o espaço objeto com a imagem a partir de pontos de controle (PC) para georreferenciar um bloco fotogramétrico e determinação dos POE, demandando pelo menos 3 pontos de controle não colineares por imagem para a resolução das incógnitas (RUY, 2008). Além disso, pontos de checagem (também

conhecidos como de verificação, ou simplesmente PV) são importantes para inferir a qualidade posicional do produto final.

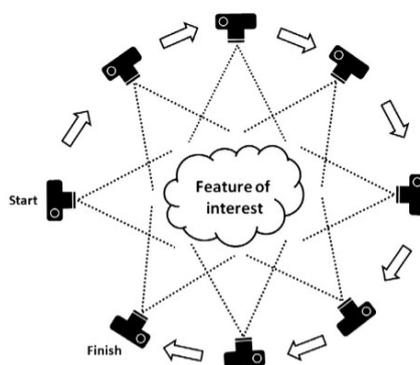
Em ambos os casos, os pontos devem ser fotointerferíveis e podem ser coletados em elementos da paisagem (como quinas de passeios, bueiros e outras) ou em sinalizações adicionadas (pré-sinalização) antes do voo através de pinturas, placas, papel ou até com o uso de cal.

Na aplicação de RPA, todos esses conceitos são considerados. Entretanto, novas técnicas e processos são aplicados em softwares modernos, como o algoritmo SFM (Subseção 2.2).

2.2 STRUCTURE-FROM-MOTION

Em paralelo ao desenvolvimento das técnicas digitais da Fotogrametria, na década de 1970 foram desenvolvidos pelo cientista da computação Shimon Ullman os primeiros algoritmos de visão computacional baseados em *Structure-from-Motion* (SfM). A reconstrução tridimensional métrica única de um elemento é possível a partir de três imagens contendo no mínimo 4 pontos homólogos (FRANCO; NAIME, 2021). O conceito principal por trás desta metodologia é determinar coordenadas tridimensionais do elemento de interesse (*estrutura/structure*) a partir da noção de movimento (*motion*) da câmera.

FIGURA 5 – MOVIMENTO DA CÂMERA



FONTE: Westoby (2012).

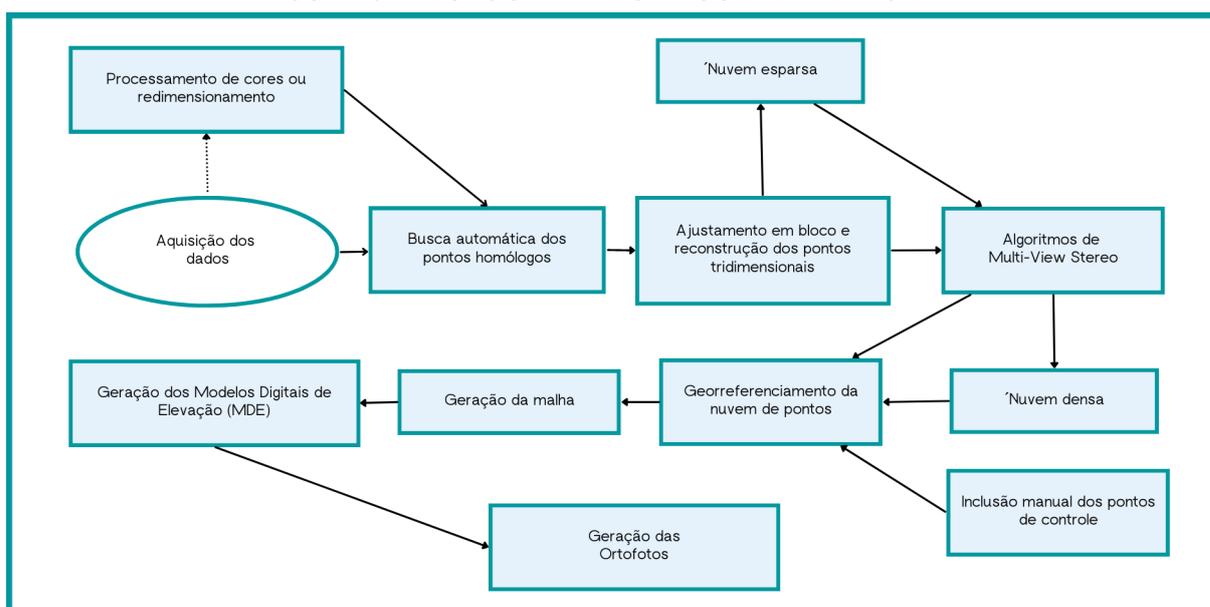
Segundo (WESTOBY et al., 2012), o *Structure-from-Motion* difere da fotogrametria tradicional, na medida em que a geometria da cena (pontos no espaço-objeto), as posições da câmera e a orientação são resolvidas

automaticamente sem a necessidade de especificar *a priori*, uma rede de pontos de controle. Isso é possível pois as soluções são obtidas simultaneamente usando um ajuste de pacote iterativo altamente redundante, baseado em uma base de dados de recursos extraídos automaticamente a partir de um conjunto de múltiplas imagens sobrepostas.

É importante frisar que a origem do SfM possui profunda ligação com os desenvolvimentos providos pela comunidade de visão computacional 3D e, por isso, o seu fluxo de trabalho se apresenta com grandes diferenças da fotogrametria tradicional, tendo um processamento consideravelmente mais automatizado (WESTOBY et al., 2012). Por conta desta característica automatizada, e do próprio modelo matemático empregado, o SfM requer a determinação da posição de uma grande quantidade de pontos, o que demanda alto nível de sobreposição entre as tomadas, tendo como recomendação valores entre 70% e 90% para produtos de acurácia submétrica (MENDES PITOMBEIRA; ADERSON DOS REIS FILHO, 2020).

Outra grande divergência entre essas técnicas é que, enquanto a fotogrametria convencional depende da obtenção de imagens com uma rígida estruturação geométrica, uso de câmeras especiais, escala e angulação fixas, o SfM é capaz de reconstruir informações tridimensionais a partir de fotografias adquiridas com sensores comuns e com movimentação arbitrária.

FIGURA 6 – FLUXOGRAMA DO PROCESSAMENTO SFM



FONTE: O autor (2022).

Apesar de opcionais, os pontos de controle de solo podem ser adicionados para georreferenciar a nuvem de pontos de forma mais precisa, para que posteriormente possam ser gerados o MDE e a ortofoto com escalas e referências espaciais corrigidas (SHERVAIS, 2016). Por conta dessas características, a lógica na determinação da quantidade e no posicionamento dos pontos de controle se difere em relação à Fotogrametria Clássica, pois enquanto as soluções baseadas em fototriangulação requerem pelo menos 3 pontos de controle visíveis em cada imagem, no SfM os pontos não necessitam de tal requisito, demandando somente uma espacialização não agrupada dos mesmos para gerar um georreferenciamento homogêneo da nuvem de pontos.

2.3 RPAS E VOOS AUTOMATIZADOS

Desde meados do século XX, as aeronaves fazem parte do cotidiano do ser humano, seja através do transporte de pessoas, objetos, animais ou também através do seu uso em propósitos específicos como o militar ou para mapeamento com o uso de fotogrametria.

Qualquer equipamento que consiga se sustentar na atmosfera utilizando reações do ar que não sejam contrárias à superfície da terra são conceituados como aeronave. Quando este aparelho é operado sem um piloto a bordo, podemos chamá-lo de aeronave não tripulada, e dentro dessa classificação, existem as que são pilotadas remotamente que são chamadas de *Remotely Piloted Aircraft* (RPA) (MAGELLA, 2016), este termo pode ser traduzido para Aeronaves Remotamente Pilotadas.

A concepção das RPAs se originou para fins militares, entretanto o seu uso se popularizou no meio civil através do seu uso para diversas finalidades, como o transporte de objetos, filmagens, fotografia (em diversos segmentos), entre outros. No contexto da engenharia não foi diferente, trazendo aplicações em diversas áreas como a de mapeamento, mineração, ambiental, construção civil, etc.

2.3.1 Legislação Aplicável às RPAs

Como todo produto eletrônico com funcionalidades de telecomunicação em funcionamento no território nacional, as RPAs demandam a sua homologação junto

à Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). Tal cadastro é necessário para garantir que o equipamento esteja de acordo com as frequências de comunicação em vigor no país, bem como respeite os parâmetros de fabricação que garantam a sua segura operação.

Quanto a operação das RPAs, o Brasil controla as atividades realizadas através de duas Autoridades Aeronáuticas, sendo a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) responsável pela certificação dos equipamentos, homologação de pessoal e determinação dos requisitos técnicos para cada tipo de operação, e o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) responsável por determinar os parâmetros e pelo controle do espaço aéreo brasileiro.

FIGURA 7 – TIPOS DE OPERAÇÃO DE RPAS



FONTE: ANAC (2022)

Segundo o Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial nº 94 (RBAC-E nº 94), divulgado pela ANAC, os equipamentos com Peso Máximo de Decolagem (PMD) abaixo de 250g voltados à atividade recreativa são considerados aeromodelos e têm um controle de uso mais simplificado. Já as RPAs (voltados a uso profissional) são classificados em 3 classes: Sendo a Classe 1 para equipamentos com peso maior que 150 kg, a Classe 2 composta pelas aeronaves com PMD maior que 25 kg e menor ou igual a 150 kg e a Classe 3 com peso igual ou abaixo de 25 kg..

Este regulamento também conceitua os tipos de operação, que são divididas em 3 tipos (FIGURA 7): a operação em Linha de Visada Visual (*Visual Line of Sight* – *VLOS operation*) que significa a realização do voo em condições na qual o piloto consegue manter o contato visual direto com a aeronave sem a necessidade do auxílio de observadores de RPA, lentes ou outros equipamentos.

FIGURA 8 – RESUMO DAS EXIGÊNCIAS DA ANAC

	RPAS Classe 1	RPAS Classe 2	RPAS Classe 3	Aeromodelos
Registro da aeronave?	Registro	Registro	BVLOS: Registro VLOS: Cadastro	Cadastro
Aprovação ou autorização do projeto?	Sim	Sim	Apenas BVLOS ou acima 400 pés	Não
Limite de idade para operação?	Sim	Sim	Sim	Não
Certificado médico?	Sim	Sim	Não	Não
Licença e habilitação?	Sim	Sim	Apenas para operações acima de 400 pés	Apenas para operações acima de 400 pés
Local de operação	Áreas distantes de terceiros			

FONTE: ANAC (2022).

Outra operação conceituada na RBAC-E nº 94 é a Operação em Linha de Visada Visual Estendida (*Extended Visual Line of Sight – EVLOS operation*), onde o piloto não consegue manter o contato visual direto com a RPA sem o auxílio de lentes ou outros equipamento, necessitando do auxílio de observadores de RPA para a sua operação. Por último, traz o conceito de operação Além da Linha de Visada Visual (*Beyond Visual Line of Sight – BVLOS*), onde o voo é realizado sem a visualização direta da aeronave, com sua operação sendo realizada com o auxílio de sensores e telemetria.

O ICA 100-40, 2016, documento elaborado pelo Comando da Aeronáutica, determina que as RPAs poderão acessar o espaço aéreo brasileiro somente após a anuência, através de Autorização Especial, fornecida pelo órgão regional do DECEA responsável pelo monitoramento do espaço aéreo na região do voo (CECCON, 2018).

Para além das legislações envolvendo diretamente o uso e operação de RPAs, existe também uma legislação específica que versa sobre a realização de aerolevantamentos. O Decreto-Lei nº 1.177/1971 dispõe sobre aerolevantamentos no território nacional, e em seu artigo primeiro, quarto e sexto explicita que esta atividade só poderá ser executada pelo governo (federal ou estadual) ou por empresas cadastradas junto ao Ministério da Defesa:

“Art. 1º A execução de aerolevantamentos no território nacional é da competência de organizações especializadas do Governo Federal.

Parágrafo único. Podem, também, executar aerolevantamentos outras organizações especializadas de governo estaduais e privadas na forma estabelecida neste Decreto-lei e no seu Regulamento.

[...]

Art. 4º O Estado-Maior das Fôrças Armadas é o órgão oficial incumbido de controlar as atividades de aerolevantamentos no território nacional, na forma especificada no Regulamento do presente Decreto-lei.

[...]

Art. 6º As organizações a que se refere o parágrafo único do artigo 1º poderão ser autorizadas a executar aerolevantamentos desde que estejam inscritas no Estado-Maior das Forças Armadas em uma das seguintes categorias:

- a) executantes de todas as fases do aerolevanteamento;
- b) executantes apenas de operações aéreas e/ou espaciais;
- c) executantes da interpretação ou de tradução dos dados obtidos em operações aéreas e/ou espaciais por outras organizações.”

2.3.2 Modelos de RPA

Dentre os vários tipos de RPAs, os que mais se destacam para a finalidade de coleta de imagens para fins fotogramétricos são os modelos de asa fixa e os modelos multirotores.

No contexto das indústrias do ramo civil, várias empresas se especializaram no projeto e produção de RPAs e sua tecnologia embarcada, como sensores de proximidade, estabilizadores e câmeras. Dentre as principais empresas que fazem este tipo de aeronave para finalidades comerciais em venda no Brasil podemos mencionar:

FIGURA – MODELOS DE RPA



a) DJI Mavic 3



b) SenseFly Ebee Geo



c) NuvemUAV Spectral 2

FONTE: O autor (2022).

- a) DJI: É uma empresa chinesa especializada na produção de estabilizadores, cameras e RPAs, atualmente ela é uma das principais empresas do seguimento comercial de baixo custo e suas principais linhas são a série Matrice 30, a linha Mavic, a série Phantom, a série Air e a linha Mini.
- b) Sensefly: Em 2009, a empresa AgEagle fundou a senseFly, que é uma marca que desenvolve e produz uma linha proprietária de RPAs de asa fixa com a marca eBee para uso profissional. Sua principal premissa é que seus produtos sejam seguros, ultra-leves e fáceis de usar, almejando serem utilizados na construção, agricultura, levantamento, governo, e entre outras aplicações. Seus principais modelos da linha eBee são o eBee X, eBee Geo e o eBee Ag.
- c) NuvemUAV: uma das principais representantes brasileiras na produção de aeronaves remotamente pilotadas, foi fundada em 2007 tendo como objetivo inicial a produção de aeromodelos para fins diversos e se especializou no projeto e produção de RPAs voltados à atividade de mapeamento, sendo suas duas principais linhas a Spectral, que envolve aparelhos multirotores e a linha BatMap que se trata de aparelhos de asa fixa.

2.3.2.1 Áreas de aplicação da Fotogrametria por RPA

A utilização de câmaras não-métricas embarcadas em RPA para a confecção de produtos fotogramétricos como ortofotos, modelos digitais de elevação e nuvem de pontos viabilizou projetos técnicos com aplicações em terminalidades

como na Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, de Minas, Ambiental, Civil, entre outras. Dentre essas diversas aplicações, pode-se citar:

QUADRO 1 – APLICAÇÕES DA FOTOGRAMETRIA COM O USO DE RPA

Finalidade	Aplicações
Engenharia de Agrimensura e Cartográfica	Elaboração de ortofotos, elaboração de modelos digitais de elevação (MDE), geração de curvas de nível, atualização de cartas vetoriais, mapeamento do uso e ocupação do solo, entre outras.
Engenharia Ambiental	Mapeamento de restrições ambientais, estimativa de volume de material lenhoso, identificação das temáticas do Cadastro Ambiental Rural (CAR), etc.
Engenharia Civil	Acompanhamento e fiscalização de canteiro de obras, Acompanhamento, fiscalização do piso de rodovias, entre outras.
Engenharia de Minas	Acompanhamento de minas abertas, estimativa do volume de pilhas de minérios, acompanhamento de impactos ambientais, etc.
Agronomia	Análise da situação do campo, contagem de animais, planejamento de linhas de plantio, avaliação da saúde das culturas, entre outras.
Arquitetura	Modelagem tridimensional de estruturas.

FONTE: O autor (2022).

Todas essas aplicações dependem de softwares que permitem a aquisição de dados *in loco* e posteriormente seu processamento, como apresentado nas subseções que seguem (2.3.2).

2.3.3 Softwares de planejamento de voo

Associado à alta tecnologia embarcada nas RPAs, vários softwares foram desenvolvidos para automatizar a movimentação das aeronaves de forma a atingir diferentes objetivos do voo.

Uma linha de desenvolvimento desses softwares foi a de filmagem, que permite por exemplo que, com o auxílio de algoritmos e inteligência artificial, a aeronave siga um determinado objeto ou pessoa sem que haja movimentos bruscos. Isso permite atingir uma filmagem de qualidade sem a necessidade da operação de um piloto altamente especializado.

Outro objetivo de desenvolvimento foi a automatização dos voos para fins de fotogrametria, onde são definidas as linhas de voo a partir de parâmetros definidos pelo usuário, como a sobreposição longitudinal, sobreposição lateral, altura de voo,

inclinação da câmera, direção do voo, a região a ser mapeada, entre outros (FIGURA 10).

FIGURA 9 – EXEMPLO DE PLANO DE VOO NO APP DRONE DEPLOY



FONTE: O autor (2022)

Após a definição destes parâmetros e início do voo o software controla as ações de movimento da aeronave, bem como o momento da tomada das fotos. Alguns exemplos de softwares são citados não QUADRO 2.

QUADRO 2 – APLICATIVOS DE PLANEJAMENTO DE VOO

Aplicativos	Tipo de investimento
DJI Terra	Pago
DJI Pilot	Gratuito
PIX4Dcapture	Gratuito
Drone Deploy	Gratuito
Drone Harmony	Gratuito
Litchi	Gratuito

FONTE: O autor (2022).

Diferentemente dos programas de processamento de dados, pode-se notar no QUADRO 2, que existem diversas opções de uso gratuito. As principais opções de processamento de dados fotogramétricos são descritas nas sessões 2.4 (Comerciais) e 2.5 (Gratuitos).

2.4 PRINCIPAIS SOLUÇÕES COMERCIAIS DE PROCESSAMENTO

Por conta da diversidade de aplicações dos produtos gerados a partir dos softwares baseados em *Structure-from-Motion*, bem como do uso de RPA para essa

finalidade, diversas empresas se especializaram no desenvolvimento e venda de soluções de processamento destes dados. Dentre os principais programas pagos, podemos citar o Agisoft Metashape, o Pix4Dmapper, o SimActive Correlator 3D e o DroneDeploy.

2.4.1 Agisoft Metashape

Em 2006 foi fundada a Agisoft, empresa que se reconhece como sendo focada em pesquisa inovadora com ênfase em tecnologias de visão computacional. Seu primeiro produto comercial para o mercado da fotogrametria digital foi o Agisoft PhotoScan, que é uma solução definida como de modelagem 3D baseado em reconstrução de multi-visualização onde todo o processo de alinhamento de imagens e reconstrução 3D são automatizados.

Na versão 1.5.0 do software, foi renomeado para Agisoft Metashape e atualmente encontra-se na versão 1.8.4 que pode ser baixada em licença gratuita de testes com duração de 30 dias.

2.4.2 PIX4D

De origem suíça, a empresa PIX4D foi fundada no ano de 2011 com o objetivo de impactar o mercado da fotogrametria ao ampliar as possibilidades de aplicação através do uso de RPAs. Com missão voltada à pesquisa e desenvolvimento, a PIX4D se destaca como uma das principais provedoras de soluções de processamento de dados SfM oriundos de RPA. A empresa desenvolve um conjunto de softwares voltados ao mapeamento, modelagem 3D e análise de dados espaciais. Dentre essas soluções, as voltadas para a obtenção dos produtos de fotogrametria é o PIX4Dmapper (para até 1000 imagens), o PIX4Dmatic (para conjuntos maiores que 1000 imagens) e PIX4Dcloud (para o processamento em nuvem).

2.5 SOFTWARES LIVRES

Segundo (KON; LAGO, [s.d.]), uma parte considerável dos softwares desenvolvidos e utilizados atualmente são disponibilizados sob licenças restritivas,

que impõem limitações quanto ao seu uso, distribuição ou de acesso ao código-fonte. Tais restrições podem trazer implicações como a inviabilidade financeira do uso de determinado tipo de *software*, ou a impossibilidade de implementação de melhorias identificadas pela comunidade por usuários avançados.

Em contraponto aos programas de licença restritivas, foram criados os softwares livres. O conceito de *software* livre está bastante associado ao espírito de comunidade e a liberdade dos usuários. De forma resumida, a ideia é que os indivíduos devem ter a liberdade de executar, distribuir, copiar, mudar, estudar e melhorar o *software*.

O movimento software livre surgiu no início dos anos 1980 idealizado como sendo uma comunidade que objetiva o compartilhamento tecnológico e se espalhou pelo mundo através da rede mundial de computadores. Seus defensores são diversos, passando por *hackers*, programadores, cientistas e forças político-culturais que buscam a universalização dos benefícios da era da informação. (SILVEIRA, 2018)

“O uso local de programas desenvolvidos globalmente aponta ainda para as grandes possibilidades socialmente equalizadoras do conhecimento. Assim, em uma sociedade de geração e uso intensivo do conhecimento, estamos criando uma rede que permite redistribuir a todos os seus benefícios.”. (SILVEIRA, 2018).

No Brasil, um grupo amplo de pessoas vem atuando em favor deste movimento por softwares livres desde meados dos anos 1990 (EVANGELISTA, 2014).

2.6 OPEN DRONE MAP

O OpenDroneMap é um software livre de código aberto que busca universalizar e facilitar o uso de imagens oriundas de RPAs para gerar nuvens de pontos, modelos digitais de elevação, ortofotos e modelos mesh. (PARK et al., 2016)

2.6.1 Origem do Software Open Drone Map

A *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo), nome que em tradução livre significa “Fundação de Código Aberto Geoespacial”, é uma entidade que busca

prover suporte financeiro, jurídico e organizacional e uma comunidade de desenvolvimento de programas, sistemas e plugins de código aberto voltados a dados geoespaciais.

Desenvolvedores da iniciativa OSGeo notaram a demanda crescente por soluções de processamento de projetos fotogramétricos com RPAs, a escassez de soluções livres a exemplo do software francês MicMac e se uniram para a criação do ODM. O seu desenvolvimento foi iniciado em 2013, através da bifurcação do código fonte do software BundlerTolls, se inspirou em projetos como Google Streetview, Mapillary e PhotoSynth e foi lançado em 2016 na *Free and Open Source Software for Geospatial* (FOSS4G). (PARK, 2016)

2.6.2 Versões do ODM

Como o software é desenvolvido de forma colaborativa por diversas pessoas, uma solução adotada para otimizar o desenvolvimento foi dividir o código fonte em vários projetos correlatos que se relacionam e possibilitam a utilização do ODM. Os principais módulos podem ser conceituados como:

- a) ODM: esta é a versão do software que foi desenvolvida para ser utilizada diretamente através de códigos de comando (Prompt de comandos do Windows, ou Terminal do Linux/Mac);
- b) WebODM: a versão do software com interface gráfica, seu foco é o público geral que busca obter os produtos fotogramétricos sem o uso de códigos na sua operação.
- c) NodeODM: é o projeto que busca implementar e melhorar soluções de gerenciamento dos Nodes de processamento, que são “cápsulas” onde são tratados os dados e que podem estar em um ou mais computadores. Este projeto auxilia no tratamento de grandes conjuntos de imagens.
- d) LiveODM: é a versão do WebODM implementada em um pen-drive “bootável” rodando uma versão de linux, que possibilita o processamento dos dados sem a instalação do software na máquina e otimiza o uso de memória RAM (se comparado com a versão Windows).

- e) CloudODM: é a solução de processamento em nuvem do ODM e tem interface baseada no uso de códigos de comando.

2.7 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE DADOS GEOESPACIAIS

A modelagem da realidade é uma premissa da produção cartográfica, que em diversos ramos é utilizada como insumo para a tomada de decisões. A avaliação da qualidade dos dados geoespaciais permite determinar quais aplicações são adequadas para cada produto gerado, acarretando em decisões mais acertivas (SANTOS et al., 2016).

Existe a necessidade de avaliação de qualidade para que esses dados possam ser integrados (ET-CQDG, 2016) e utilizados de forma coerente com suas finalidades. Com o objetivo de “fornecer uma forma padronizada para avaliar a qualidade dos produtos de conjuntos de dados geoespaciais”, a Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG) se baseia na ISO 19157 para definir os elementos de qualidade a serem avaliados, sendo eles descritos como:

- a) Completude: elemento que avalia a existência ou omissão de feições no dado geoespacial, de acordo com a escala adotada e com o modelo conceitual (que pode ser, por exemplo, a ET-ADGV e a ET-EDGV);
- b) Consistência lógica: são os parâmetros que avaliam se o dado respeita as regras lógicas definidas referentes à estrutura dos dados, das relações e dos atributos;
- c) Acurácia posicional: elemento cujo objetivo é avaliar a qualidade do posicionamento dos elementos do dado geoespacial através da comparação com dados mais acurados.
- d) Acurácia temporal: refere-se a exatidão avaliada referente a variável temporal dos dados, sendo dividida em avaliação da consistência temporal (ordem em que os eventos ocorrem), medida de tempo (acurácia de um atributo temporal em relação ao valor real) e validade temporal (o tempo correspondente à não defasagem do dado).
- e) Acurácia temática: é a avaliação da interpretação dos elementos e dos atributos em comparação ao modelo conceitual preconizado.

Dentre os elementos de qualidade, neste trabalho, serão considerados primordialmente os que se relacionam com a acurácia posicional.

2.7.1 Decreto n° 89.817/1984, ET-ADGV e PEC-PCD

Dentre os instrumentos normativos que dispõem sobre a avaliação da exatidão posicional de dados cartográficos, o Decreto n° 89.817/1984 foi um grande avanço à sua época, trazendo o conceito de Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), que é a discrepância entre a coordenada na carta avaliada e a coordenada do mesmo elemento coletada com um método mais preciso. Além deste conceito, é considerado também o Erro-padrão (EP), que avalia a discrepância de um elemento em relação à média amostral. Com esses dois elementos, ao considerar no mínimo 90% dos valores encontrados, as cartas são classificadas em 3 classes (A, B e C) e também em função da escala. Se um conjunto de dados não for aprovado em uma classe maior, deverá ser avaliado em uma classe menor, e assim sucessivamente. Se a última classe for alcançada em uma escala, o dado deve ser avaliado em uma escala menor seguindo os passos anteriores até que se encontre uma classificação em que se enquadre.

Na TABELA 2, estão descritos os parâmetros de avaliação do PEC para as escalas maiores que 1:25.000.

TABELA 2 – PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA (PEC)

PEC	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000	
	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP
A	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00	12,50	7,50
B	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00	20,00	12,50
C	1,00	0,60	2,00	1,2	5,00	3,00	10,00	6,00	25,00	15,00

FONTE: Decreto n° 89.817 (1984).

Com o passar dos anos, e o desenvolvimento de tecnologias de aquisição, processamento e representação em meio digital trouxe a necessidade de atualização e complementação destes padrões de avaliação da qualidade posicional. Esta demanda foi suprida com a elaboração, por parte da Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (DSG), da Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV), nela está descrita a nova tabela de Exatidão Cartográfica denominada Padrão de Exatidão Cartográfica dos

Produtos Cartográficos Digitais onde os valores foram adaptados. É possível avaliar o PEC-PCD na TABELA 3:

TABELA 3 – PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS (PEC-PCD)

PEC	PEC-PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000	
		PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP
-	A	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70	7,00	4,25
A	B	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00	12,50	7,50
B	C	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00	20,00	12,50
C	D	1,00	0,60	2,00	1,2	5,00	3,00	10,00	6,00	25,00	15,00

FONTE: ET-ADGV (2016).

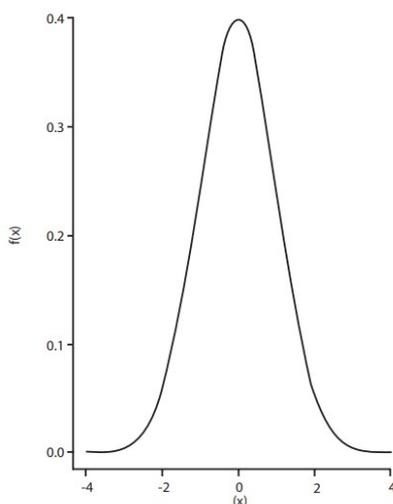
Nota-se, que os valores adotados como referência para a Classe A são menores que os adotados no padrão anterior, criando assim uma classificação em 4 níveis (A, B, C e D).

2.7.2 Avaliações Estatísticas

No procedimento de avaliação posicional, é importante detectar a presença de erros sistemáticos, aleatórios e grosseiros. O primeiro tipo de erro pode ser identificado com a presença de tendências nos dados, um exemplo seria o padrão de discrepâncias seguindo aproximadamente uma mesma direção.

O uso de dados tendenciosos impossibilita a integração entre dados em um banco de dados espaciais, podendo gerar produtos, análises e decisões que não são coerentes com a realidade. Tradicionalmente, é utilizado o teste de hipóteses t de Student para avaliar a tendência dos dados. Por padrão, essa avaliação requer uma distribuição normal das amostras (SANTOS et al., 2016).

No século XVII, a distribuição normal foi inicialmente descrita através da análise de erros experimentais que levaram a visualização de uma curva em forma de sino. Posteriormente, matemáticos e físicos desenvolveram uma função chamada de densidade de probabilidade, que era capaz de descrever de forma satisfatória os erros experimentais gerando a famosa curva (GRÁFICO 2). Para muitos teóricos, a distribuição normal é a mais importante das distribuições contínuas de probabilidade pois define muito bem diversos fenômenos de diferentes ciências. (GUIMARÃES, 2007)



FONTE: Guimarães (2007).

A distribuição normal tem sua função densidade de probabilidade (f.d.p.) que é definida por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7.1)$$

Onde:

μ – é a média da variável X;

σ – é o desvio padrão da variável X;

π – é uma constante numérica igual a 3,141593.

Para avaliar a condição de normalidade de um conjunto de amostras, uma das ferramentas utilizadas é o teste estatístico de Shapiro-Wilk. Após confirmar a condição de normalidade dos dados, é possível realizar um teste de hipóteses, segundo (TRIOLA, 2008) é um procedimento estatístico para testar afirmativas sobre uma determinada população. Através desta ferramenta conseguimos identificar se estamos diante de uma diferença real ou de uma diferença associada à aleatoriedade das medições. Para testar uma hipótese estatística, são consideradas 2 hipóteses: a chamada Hipótese nula (ou H_0) e uma hipótese complementar (H_1).

No contexto da avaliação posicional de produtos fotogramétricos, o teste de hipóteses t-student pode ser utilizado de forma satisfatória para inferir se um grupo

de amostra (discrepâncias de pontos de checagem) possuem erros sistemáticos (tendências).

Por sua vez, o teste t-Student para amostras pareadas, ou teste t de amostra dependente, é uma ferramenta estatística utilizada para avaliar hipóteses sobre a diferença média entre 2 conjuntos de observações de elementos comuns. Em um teste t de amostra pareada, cada elemento é medido duas vezes, resultando em pares de observações.

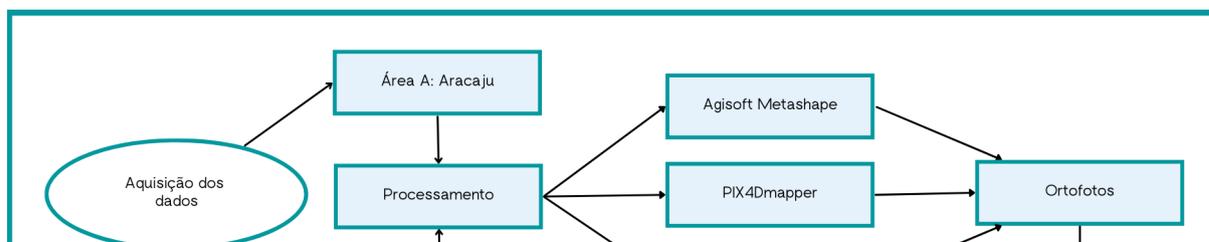
3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta para o trabalho consiste no processamento e análise estatística dos resultados encontrados nos 3 softwares a serem avaliados (WebODM, PIX4Dmapper e Agisoft Metashape). A fim de se atingir os objetivos determinados, as seguintes etapas foram aplicadas:

1. Ida a campo, realização do voo aerofotogramétrico e coleta dos pontos de controle e de checagem (ou a reunião dos dados coletados e cedidos por outros pesquisadores). Para essa etapa empregou-se dois levantamentos fotogramétricos com parâmetros e equipamentos distintos, um em Salvador-BA e o segundo na região costeira da cidade de Aracaju-SE;
2. Processamento das imagens nos softwares WebODM, PIX4Dmapper e Agisoft Metashape;
3. A partir dos resultados obtidos nos processamentos da etapa 2, empregou-se o PEC-PCD para avaliar a qualidade posicional e as diferenças entre os produtos gerados.

De forma mais completa, pode ser visto na FIGURA 11 o fluxograma de trabalho adotado.

FIGURA 10 – FLUXOGRAMA METODOLÓGICO.

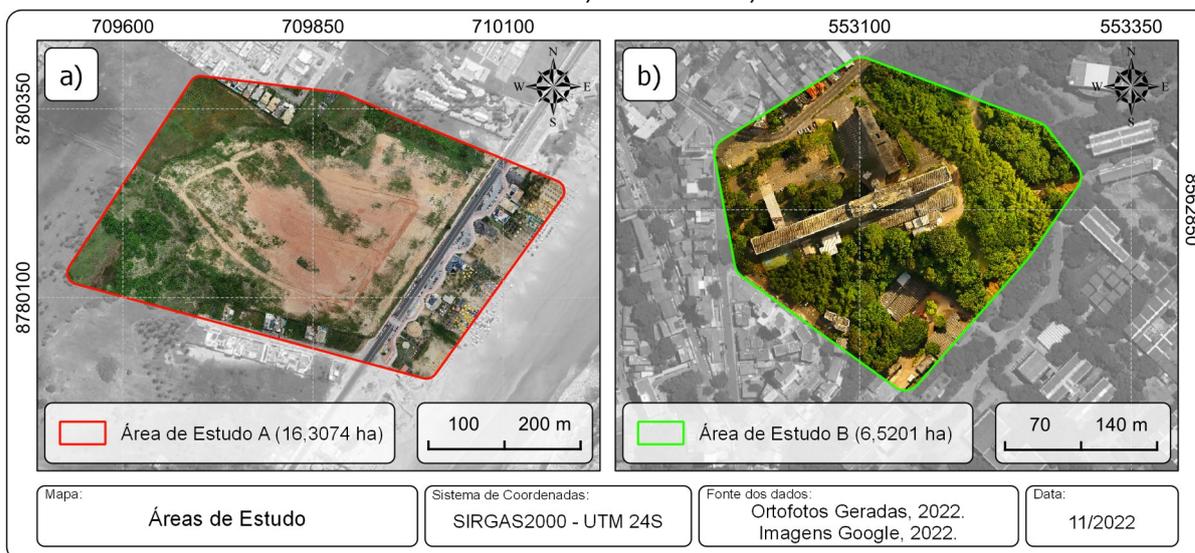


FONTE: O autor (2022).

3.1 ÁREAS DE ESTUDO

Para avaliar os 3 softwares, em regiões com diferentes configurações de relevo e disposição espacial de objetos foram realizados dois experimentos: 1) Loteamento em Aracaju-SE e 2) Escola Politécnica (UFBA), conforme ilustrados na FIGURA 12.

FIGURA 11 – ÁREA DE ESTUDO a) ARACAJU b) ESCOLA POLITÉCNICA



FONTE: O autor (2022).

A primeira área de estudos trata-se de uma região com relevo plano (FIGURA 12a), enquanto a segunda (FIGURA 12b) trata-se de uma região com relevo irregular. Na subseção 3.2, descrevem-se os materiais empregados neste trabalho.

3.2 MATERIAIS

Para a aquisição dos dados *in loco*, processamento e avaliação foram empregados um conjunto de equipamentos e softwares para imageamento e determinação das coordenadas geodésicas de pontos de controle e verificação. O conjunto de equipamentos são listados no QUADRO 3.

QUADRO 3 – MATERIAIS EMPREGADOS NA AQUISIÇÃO DE DADOS

Materiais	Loteamento em Aracaju-SE	Escola Politécnica (UFBA)
RPA Receptores GNSS	Phantom 4 Pro Spectra Precision	Phantom 4 Spectra Precision
Computador	Notebook Lenovo Ideapad 3, processador Ryzen 7 5700u, 20 gb de memória RAM	Notebook Lenovo Ideapad 3, processador Ryzen 7 5700u, 20 gb de memória RAM
Software de Planejamento de Voo	DJI Pilot	Drone Deploy
Software de Processamento GNSS	Topcon Tools 2.8	Topcon Tools 2.8
Software de Geoprocessamento	QGIS 3.20.3	QGIS 3.20.3
Software de Análise Estatística	Jamovi 2.3.18	Jamovi 2.3.18
Software de Análise da Acurácia Posicional	GeoPEC 3.5.1	GeoPEC 3.5.1

FONTE: O autor (2022).

Na subseção 3.3 descreve-se a metodologia empregada neste trabalho.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Aquisição de dados *in loco*

O processo de aquisição de dados para ambas as áreas de estudo ocorreu em momentos distintos. Na primeira, Loteamento em Aracaju-SE, as atividades de campo foram realizadas em um único dia com o apoio dos técnicos da prefeitura de Aracaju (FIGURA 13), no ano de 2022.

FIGURA 12 – IMAGENS DA AQUISIÇÃO DOS DADOS DA ÁREA A



FONTE: O autor (2022).

Na segunda, Escola Politécnica (UFBA), o levantamento foi executado em 2 partes: Primeiramente em 2021 pelo então formando Elmo Bispo (aquisição de dados com RPA e uma parcela dos pontos de controle e de checagem), e de forma posterior, em 2022, um segundo conjunto de pontos de controle e checagem para a complementação da base de dados (FIGURA 14).

FIGURA 13 – IMAGENS DA AQUISIÇÃO DE PARTE DOS DADOS DA ÁREA B

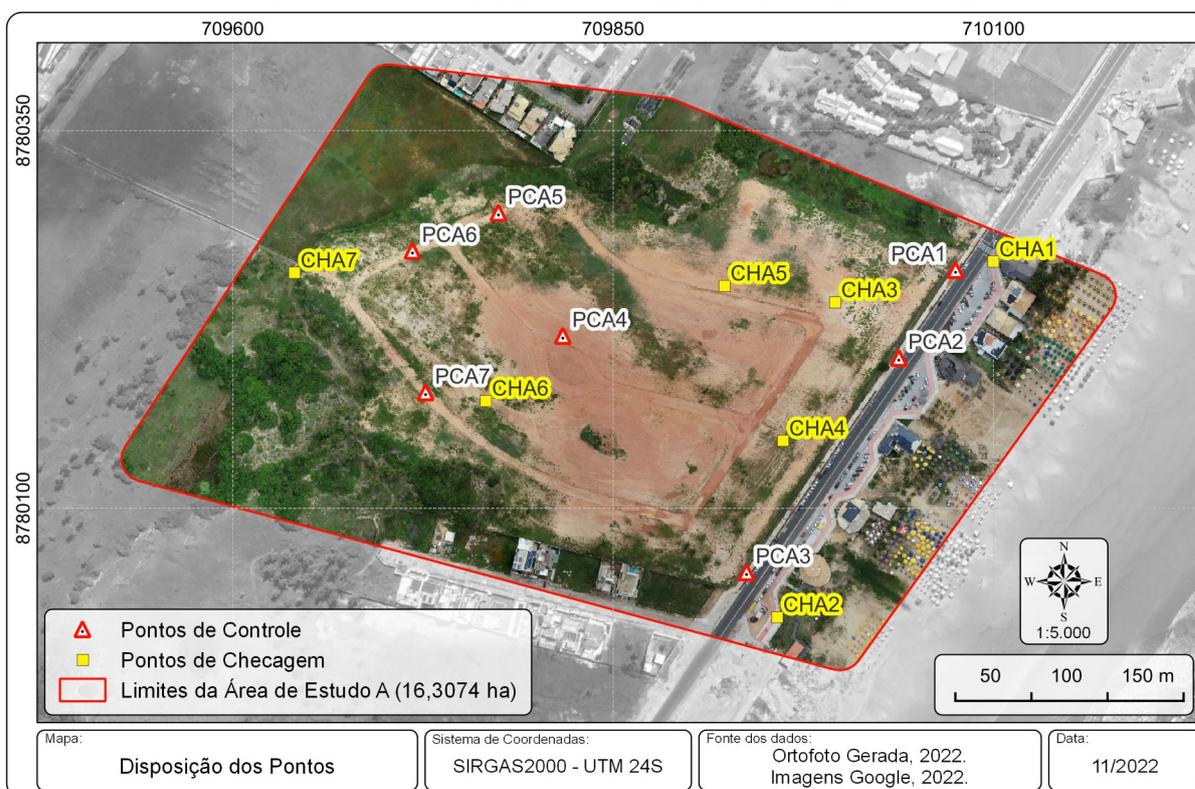


FONTE: O autor (2022).

Os levantamentos geodésicos dos pontos de controle e de checagem foram realizados com receptores de dupla frequência empregando o método de posicionamento relativo estático rápido.

O processamento dos dados considerou como base as estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), respectivamente para Loteamento em Aracaju e Escola Politécnica da UFBA, estação SEAJ e SSA1. Em ambas as áreas de estudo, objetivou-se uma disposição com padrão de distribuição aleatória e foram adotados pontos pré-sinalizados e fotoidentificáveis referenciados ao sistema geodésico SIRGAS2000 e projetados no sistema de projeção UTM, de fuso 24S. Em Aracaju, foram adotados 7 pontos de controle e 7 pontos de checagem, conforme FIGURA 15 e TABELA 4.

FIGURA 14 – PONTOS DE CONTROLE E CHECAGEM NA ÁREA A



FONTE: O autor (2022)

TABELA 4 – COORDENADAS DOS VÉRTICES DA ÁREA A

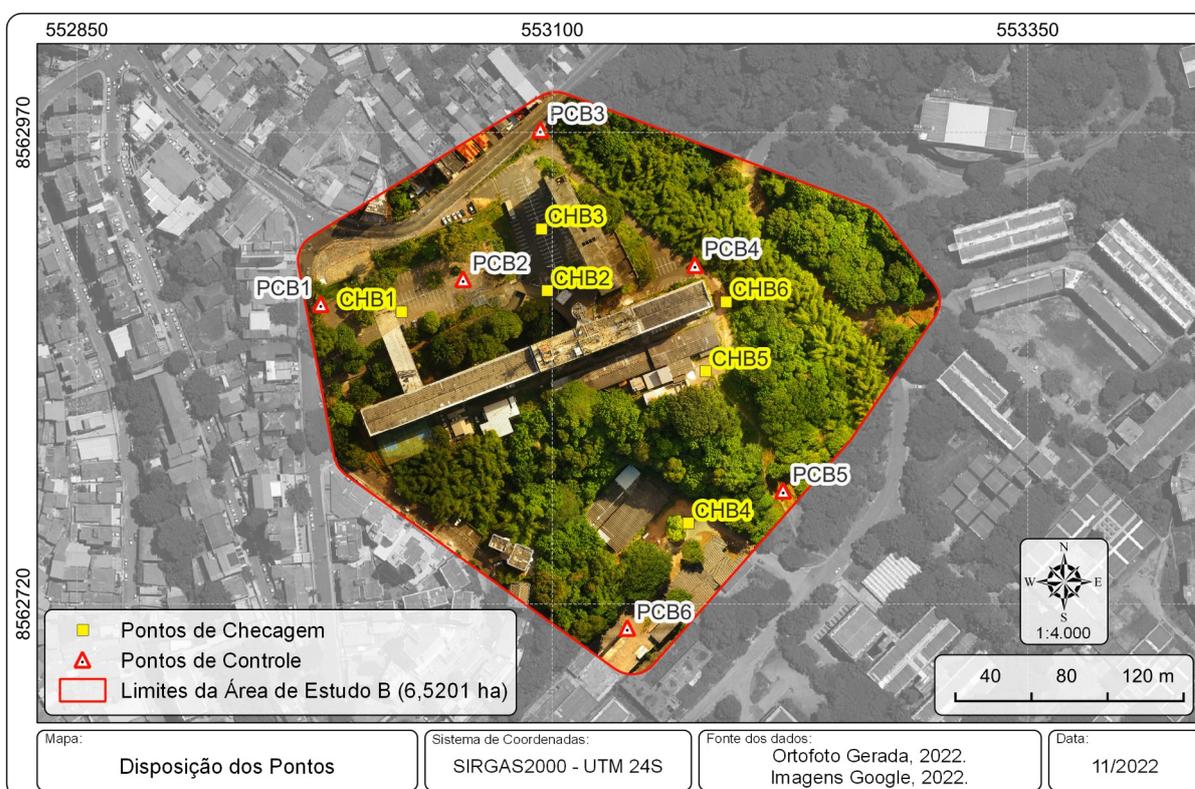
Ponto	Norte	Este	σ Norte	σ Este	σ Horizontal
PCA1	8780257,624	710075,204	0,003	0,003	0,004
PCA2	8780199,474	710037,915	0,003	0,003	0,004
PCA3	8780057,540	709937,775	0,002	0,002	0,003
PCA4	8780214,033	709816,996	0,002	0,002	0,003
PCA5	8780295,552	709774,681	0,002	0,002	0,003
PCA6	8780270,341	709718,172	0,002	0,002	0,003
PCA7	8780176,644	709726,774	0,002	0,002	0,003
CHA1	8780263,211	710100,101	0,003	0,003	0,004
CHA2	8780027,757	709958,069	0,002	0,002	0,003

Ponto	Norte	Este	σ Norte	σ Este	σ Horizontal
CHA3	8780236,180	709996,030	0,003	0,003	0,004
CHA4	8780144,647	709961,821	0,002	0,001	0,003
CHA5	8780247,059	709923,417	0,002	0,002	0,004
CHA6	8780170,929	709766,417	0,003	0,003	0,004
CHA7	8780255,870	709640,619	0,003	0,003	0,004

FONTE: O autor (2022).

Já na Escola Politécnica, foram adotados 6 pontos de controle e 6 pontos de checagem, conforme pode ser visto na FIGURA 16 e na TABELA 5.

FIGURA 15 – PONTOS DE CONTROLE E CHECAGEM NA ÁREA B



FONTE: O autor (2022).

TABELA 5 – COORDENADAS DOS VÉRTICES DA ÁREA B

Ponto	Norte	Este	σ Norte	σ Este	σ Horizontal
PCB1	8562878,933	552978,301	0,003	0,003	0,005
PCB2	8562892,156	553053,178	0,006	0,005	0,008
PCB3	8562971,343	553093,763	0,005	0,006	0,007
PCB4	8562899,667	553175,075	0,008	0,009	0,012
PCB5	8562779,992	553221,478	0,005	0,006	0,008
PCB6	8562707,235	553139,488	0,011	0,080	0,014
CHB1	8562874,868	553020,860	0,002	0,003	0,003
CHB2	8562886,130	553097,463	0,005	0,006	0,008
CHB3	8562918,767	553094,425	0,002	0,005	0,006
CHB4	8562762,873	553171,663	0,011	0,008	0,012

Ponto	Norte	Este	σ Norte	σ Este	σ Horizontal
CHB5	8562843,444	553180,714	0,010	0,010	0,014
CHB6	8562880,141	553191,535	0,010	0,013	0,016

FONTE: O autor (2022).

A configuração do voo para a aquisição de imagens dos sensores RPA é descrita no QUADRO 4.

QUADRO 4 – CONFIGURAÇÃO DE VOO

Parâmetros	Loteamento em Aracaju-SE	Escola Politécnica (UFBA)
Altura de Voo	90 metros	60 metros
Altitude de Voo	92 metros	125 metros
Sobreposição Longitudinal	83%	95%
Sobreposição Lateral	80%	75%
Número de Imagens	280	428
Tamanho das Imagens	5472 x 3648 (20MP)	4000 x 3000 (12MP)

FONTE: O autor (2022).

3.3.2 Processamento

A fim de se obter o resultado condizente com a aplicação isolada de cada um dos softwares, foram seguidos os fluxos de trabalho de processamento que melhor se adaptam aos programas e os únicos dados utilizados em comum foram os insumos (imagens e coordenadas dos pontos de controle). Para obter um equilíbrio entre a qualidade do processamento e o tempo/custo computacional adotou-se como padrão de qualidade de processamento nos 3 programas a opção imediatamente anterior a mais alta (3 de 4 no Metashape, 2 de 3 no PIX4Dmapper e 3 de 4 no WebODM). Nos tópicos seguintes foram abordadas as nuances do processamento em cada um dos softwares.

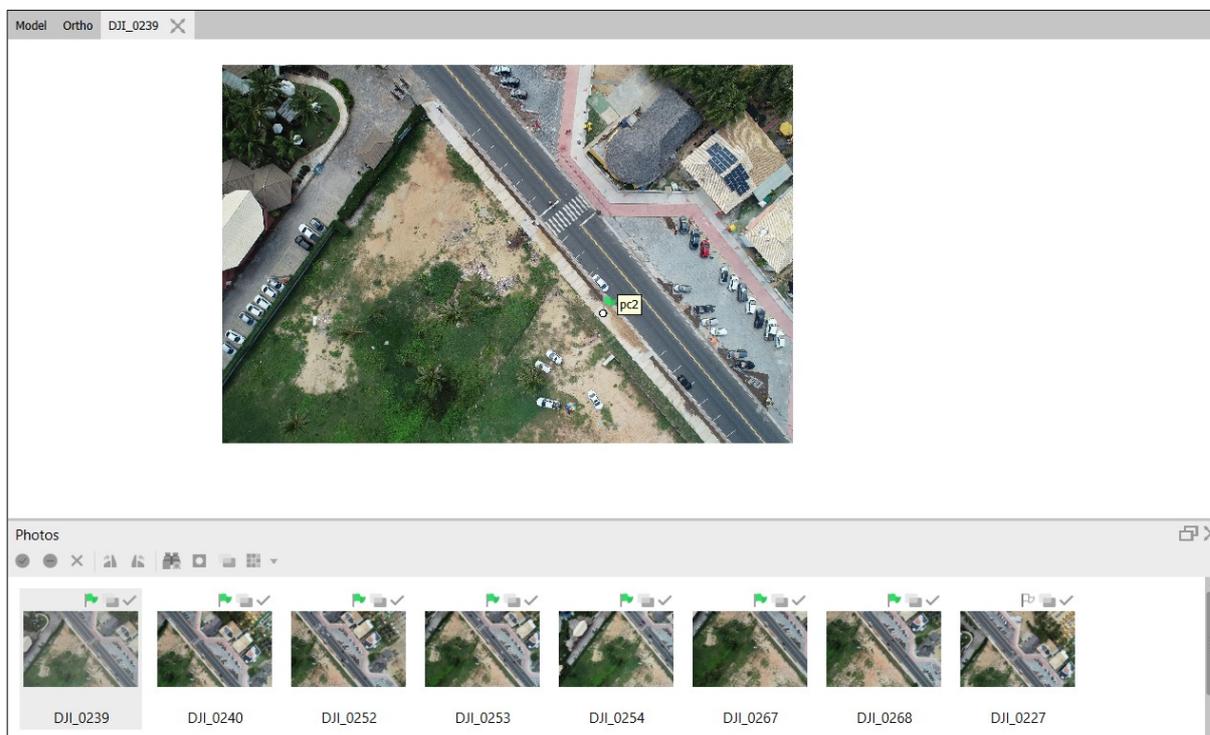
3.3.2.1 Agisoft Metashape 1.9.16.4

A solução da Agisoft traz uma interface com um processo de trabalho (*Workflow*) sequenciado e definido em uma aba na região superior do software. O primeiro passo do processamento é a etapa de alinhamento inicial das fotos sem o uso de pontos de controle.

Após a finalização da primeira etapa, é habilitada a opção de identificação dos pontos de controle nas imagens adquiridas. As imagens que contém pontos notáveis são pré-selecionadas automaticamente (através da coordenada das

imagens) após a importação da lista de pontos, sendo necessário definir manualmente a posição de cada ponto em ao menos 3 imagens (FIGURA 17).

FIGURA 16 – IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE - METASHAPE



FONTE: O autor (2022).

Após a importação dos pontos de controle e a definição deles nas imagens, é feito o processo de alinhamento das imagens e segue-se o fluxo de trabalho, executando cada etapa do processamento por vez. Para a geração de ortofotos no final do fluxo, algumas etapas não são obrigatórias, conforme QUADRO 5.

QUADRO 5 – FLUXO DE TRABALHO DO AGISOFT METASHAPE

Sequência	Etapa	Obrigatoriedade
1	Alinhar fotos (criação de nuvem esparça)	Sim
2	Criar nuvem densa de pontos	Não (pode ser usada a nuvem esparça da etapa anterior)
3	Criar malha (<i>mesh</i>)	Não
4	Criar textura	Não
5	Criar <i>tiled model</i>	Não
6	Criar MDE	Sim
7	Criar Ortomosaico	Sim
8	Criar Panorama	Não

FONTE: O autor (2022).

Após o final do fluxo é possível exportar os produtos gerados de acordo com os processamentos realizados no *workflow*. Neste trabalho foram gerados a nuvem densa de pontos (com qualidade *High*, ou 3 de 4), o MDE e o Ortomosaico das 2 áreas de estudo.

3.3.2.2 PIX4Dmapper 4.7.5

O PIX4Dmapper, por sua vez, tem o seu fluxo de trabalho baseado em templates que vão gerar diferentes produtos ao final do processamento (QUADRO 6).

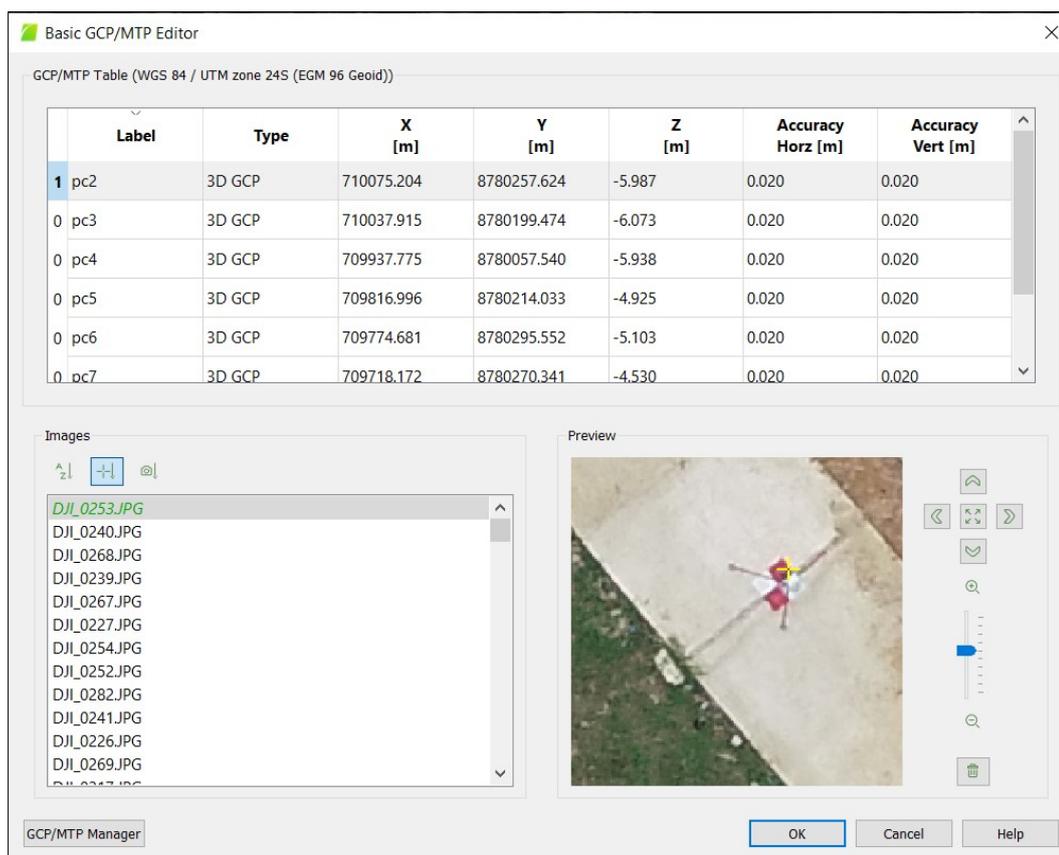
QUADRO 6 – *TEMPLATES DO PIX4D*

Número	Template	Produtos Gerados
1	3D Maps	Ortofoto, MDS, Modelo Mesh e Nuvem de pontos
2	3D Models	Modelo Mesh e Nuvem de pontos
3	Ag Multiespectral	Mapa de Reflectância, Mapa com Índices espectrais (NDVI, NDRE, etc)
4	Ag RGB	Ortofoto
5	Thermal Camera	Mapa de Reflectância
6	ThermoMAP Camera	Mapa de Reflectância, Índice Termal

FONTE: O autor (2022).

Diferentemente do Metashape, o PIX4D é organizado em somente 3 principais etapas: *Initial Processing*, onde é gerada a nuvem esparsa de pontos; *Point Cloud and Mesh*, onde é gerada a nuvem densa de pontos e o modelo *mesh*; e por último a terceira etapa chamada *DSM, Orthomosaic and Index*, onde são gerados os produtos finais (de acordo com o template escolhido). Tais etapas podem ser configuradas no início do processamento, e todo o fluxo de trabalho ser feito de uma vez.

A interface de configuração dos pontos de controle pode ser acessada no início do processamento, ou após o início da primeira etapa, o que demanda uma reotimização dos dados. Na FIGURA 18 é possível ver como são inseridos os pontos de controle.



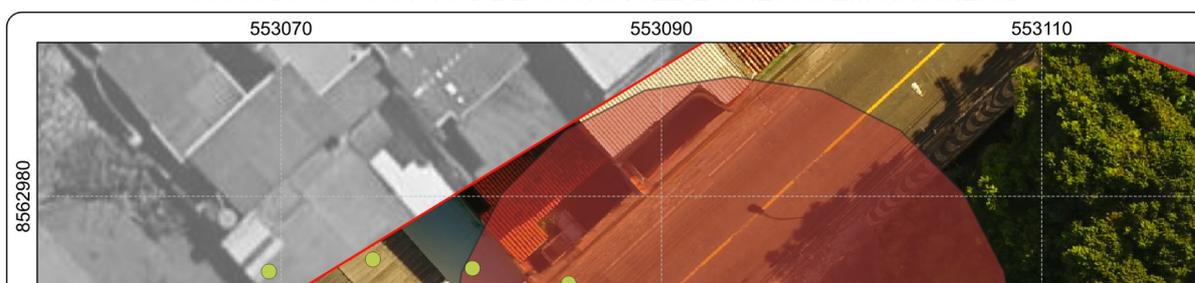
FONTE: O autor (2022).

Uma observação é que se for desejada a geração de um Modelo Digital de Terreno (MDT), um processamento extra fica acessível no menu superior do software.

3.3.2.3 WebODM 1.9.6

No WebODM, a primeira etapa a ser trabalhada é a criação de um arquivo com as informações referentes aos pontos de controle, para tal existe uma interface chamada de “Interface de GCPs”, onde inicialmente é importado um arquivo constando as coordenadas dos PCs no espaço-objeto, este arquivo foi gerado no QGIS a partir da função “Gerar arquivo de GCP a partir da camada” do Plugin LF Tools.

FIGURA 18 – PONTOS DE CONTROLE E CHECAGEM NA ÁREA B



FONTE: O autor (2022).

Uma informação importante referente ao software é que diferentemente dos demais, não existe um filtro das imagens que estão localizadas próximas aos pontos de controle e a identificação de quais imagens terão os pontos marcados fica severamente prejudicada. Tal problemática demanda uma prévia identificação em ambiente SIG, e nesta etapa foi realizado um buffer em torno dos pontos de controle e as imagens (que tiveram as suas coordenadas importadas através da função “Fotos com Geotag” do plugin supracitado) foram filtradas pela localização (FIGURA 19).

Uma das limitações do software WebODM é que a sua operação demanda uma alocação muito grande de memória RAM. Para efeito de comparação, ao processar os dois conjuntos de dados os demais softwares não excederam 8 gb de uso de memória, entretanto a solução *Open Source* diversas vezes interrompeu os processamentos apresentando um erro de falta de memória, mesmo com 19 gb à disposição.

Para solucionar tal problemática, as imagens foram reamostradas no início do processamento (através de uma função do próprio ODM) para um tamanho menor. Na Área de Estudo A houve um redimensionamento das imagens originais, de 5472 por 3648 pixels, para 3800 por 2533 pixels (FIGURA 20).

FIGURA 19 – REDIMENSIONAMENTO DAS IMAGENS DA ÁREA A



FONTE: O autor (2022).

O parâmetro de redimensionamento das imagens resulta em um aumento do GSD final por conta da simplificação realizada, resultando em ortofotos com menor resolução espacial quando comparada às geradas com a proporção original.

Já na Área de estudo B, por se tratar de um conjunto de imagens maior e requerer uma quantidade ainda maior de memória RAM, as fotos foram redimensionadas de 4000 por 3000 pixels para 3500 por 2625 pixels.

FIGURA 20 – REDIMENSIONAMENTO DAS IMAGENS DA ÁREA B



FONTE: O autor (2022).

3.3.3 Identificação dos pontos homólogos

A etapa de identificação dos elementos homólogos de avaliação foi realizada a partir coleta dos pontos em ambiente SIG. Os pontos referentes aos elementos de

checagem foram vetorizados através da identificação manual, de acordo com as imagens avaliadas geradas por diferentes softwares.

3.3.4 Avaliação posicional

Após a identificação dos pontos homólogos, foi utilizado o software LibreOffice Calc para determinar as discrepâncias referentes às 6 ortofotos geradas.

Para a etapa de classificação no PEC-PCD e da avaliação dos parâmetros estatísticos foi utilizado o software GeoPEC 3.5.1, que é uma solução gratuita desenvolvida pela Universidade Federal de Viçosa para atender a demanda de validação da qualidade de produtos cartográficos. Em suas configurações é possível gerar relatórios de qualidade associados à ET-CQDG, ao Decreto nº 89.817, e aos parâmetros de avaliação do INCRA.

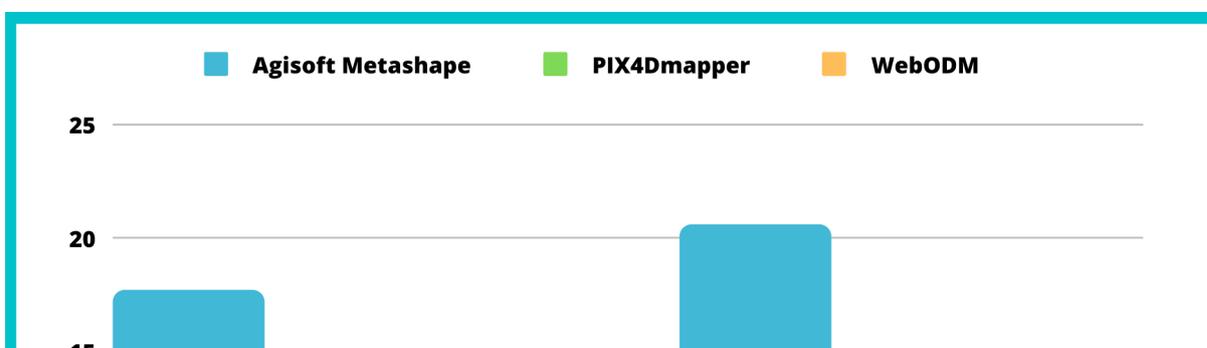
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados encontrados após a implementação das etapas descritas no capítulo anterior. No primeiro tópico são apresentados os tempos de processamento e os GSDs das ortofotos geradas nos diferentes programas, no segundo pode-se visualizar as ortofotos geradas, no terceiro são abordadas as acurácias posicionais e a classificação no PEC-PCD e no quarto são apresentados os testes de hipóteses (t-Student para amostras pareadas).

4.1 TEMPOS DE PROCESSAMENTO E GSD

O primeiro critério avaliado foi o tempo de processamento em cada um dos softwares nas duas áreas de estudo, tais dados foram obtidos através dos dados indicados nos relatórios gerados pelos softwares (GRÁFICO 3).

GRÁFICO 3 – TEMPO DE PROCESSAMENTO



FONTE: O autor (2022).

Como podemos ver no GRÁFICO 3, nas 2 áreas de estudo o software Metashape foi o que obteve o maior tempo de processamento, enquanto os demais se aproximaram com uma leve vantagem para o WebODM.

TABELA 6 – GSD DAS ORTOFOTOS GERADAS PELOS SOFTWARES

Software	GSD – Área A (cm)	GSD – Área B (cm)
PIX4Dmapper	2,36	3,07
Agisoft Metashape	2,34	2,99
WebODM	3,40	3,50

FONTE: O autor (2022).

Com relação ao GSD das ortofotos geradas (TABELA 6) nota-se que os valores entre o PIX4Dmapper e o Metashape são bem próximos e o WebODM tem um tamanho de pixel maior, essa diferença já era esperada por conta do redimensionamento das imagens no software livre.

4.2 ORTOFOTOS GERADAS

Como 2 áreas de estudo foram analisadas em 3 diferentes softwares, 6 ortofotos foram geradas de acordo com os parâmetros indicados nos tópicos

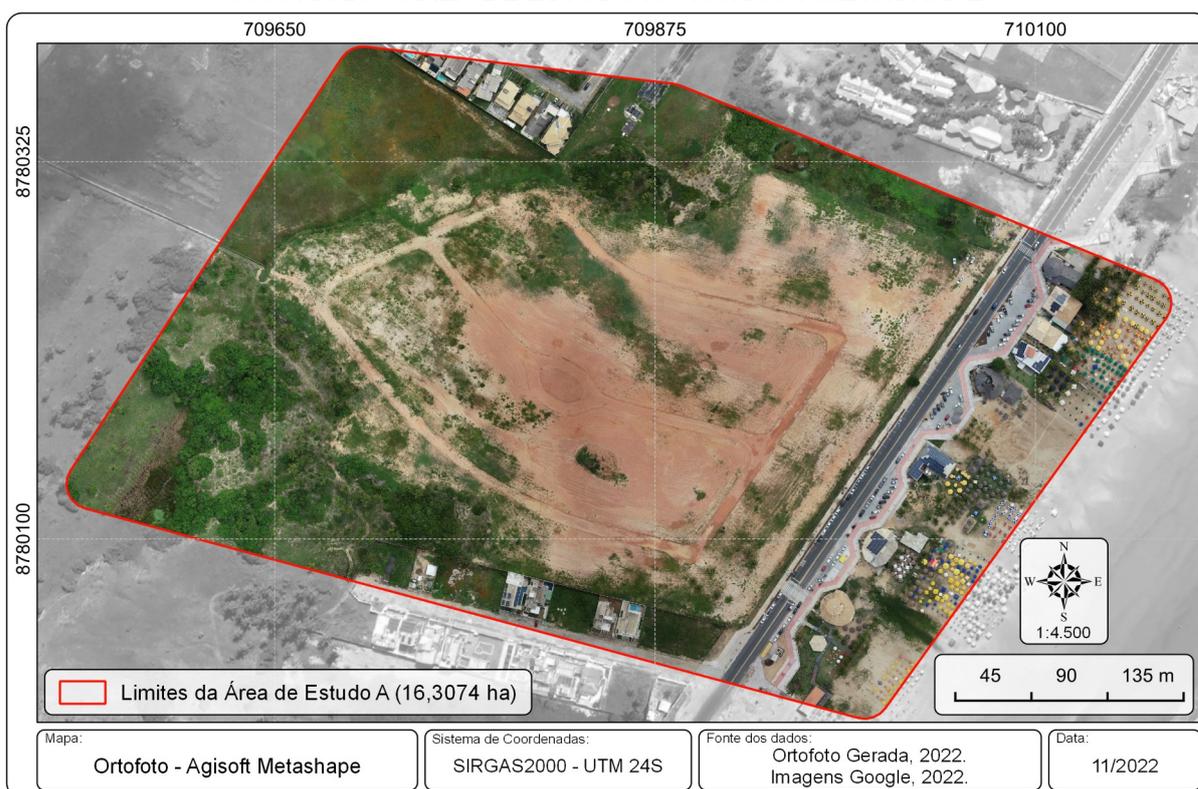
anteriores. No QUADRO 7 estão descritas em quais figuras estão representadas cada uma das ortofotos.

QUADRO 7 – ORTOFOTOS

Figura	Ortofoto
FIGURA 22	Área de Estudo A - Agisoft Metashape
FIGURA 23	Área de Estudo A - PIX4Dmapper
FIGURA 24	Área de Estudo A - WebODM
FIGURA 25	Área de Estudo B - Agisoft Metashape
FIGURA 26	Área de Estudo B - PIX4Dmapper
FIGURA 27	Área de Estudo B - WebODM

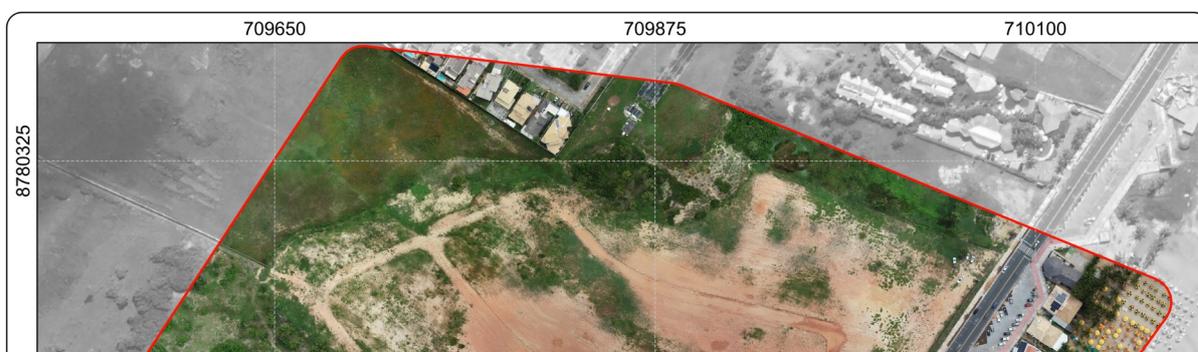
FONTE: O autor (2022).

FIGURA 21 – ÁREA DE ESTUDO A – AGISOFT METASHAPE



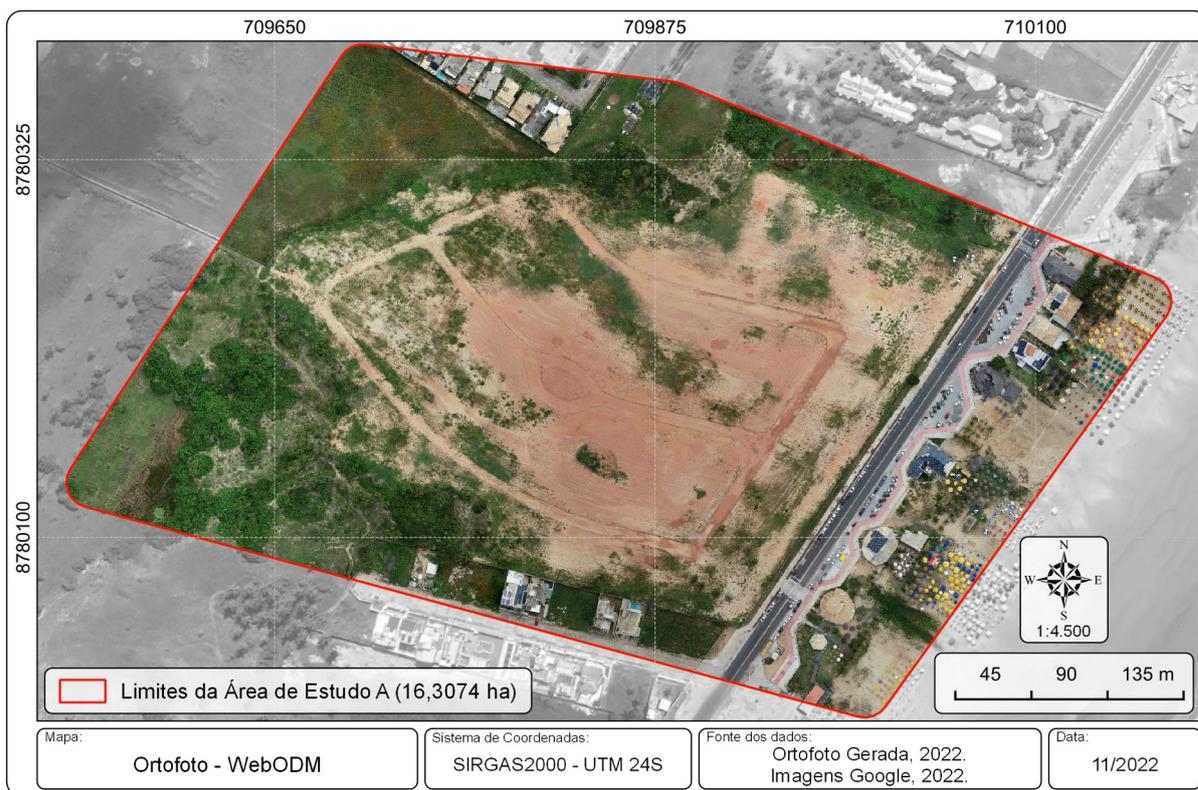
FONTE: O autor (2022).

FIGURA 22 – ÁREA DE ESTUDO A - PIX4DMAPPER



FONTE: O autor (2022).

FIGURA 23 – ÁREA DE ESTUDO A - WEBODM



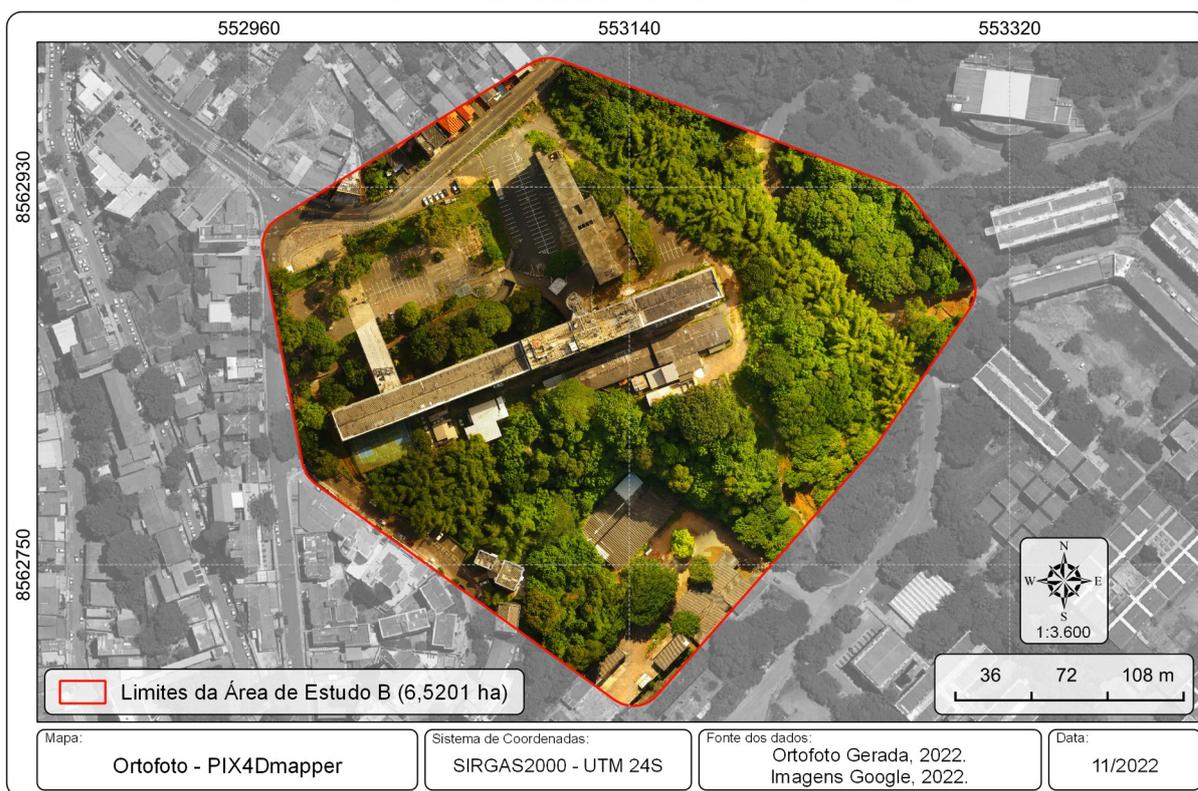
FONTE: O autor (2022).

FIGURA 24 – ÁREA DE ESTUDO B – AGISOFT METASHAPE



FONTE: O autor (2022).

FIGURA 25 – ÁREA DE ESTUDO B – PIX4DMAPPER



FONTE: O autor (2022).

FIGURA 26– ÁREA DE ESTUDO B – WEBODM



FONTE: O autor (2022).

Algumas diferenças entre as ortofotos da Área A podem ser visualizadas nas FIGURAS 28, 29, 30 e 31.

FIGURA 27 – COMPARAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO A



FONTE: O autor (2022).

FONTE: O autor (2022).

FIGURA 28 – COMPARAÇÃO 1 DA ÁREA DE ESTUDO A



FONTE: O autor (2022).

A primeira comparação gerou resultados muito semelhantes, com pequenas distorções na borda do telhado da edificação no software livre.

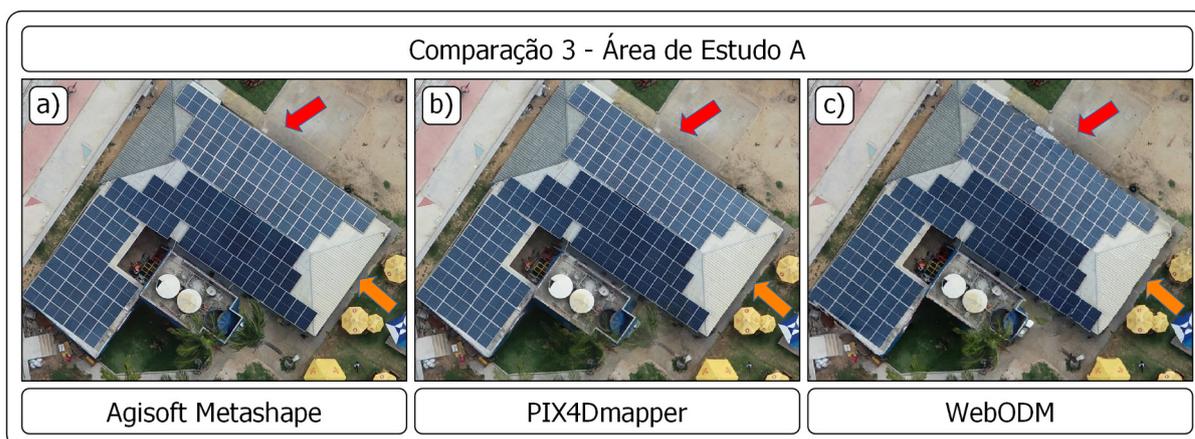
FIGURA 29 – COMPARAÇÃO 2 DA ÁREA DE ESTUDO A



FONTE: O autor (2022).

A segunda comparação teve um padrão semelhante à primeira, onde as imagens são visualmente semelhante e com pequenas distorções mais visíveis na FIGURA 30c.

FIGURA 30 – COMPARAÇÃO 3 DA ÁREA DE ESTUDO A

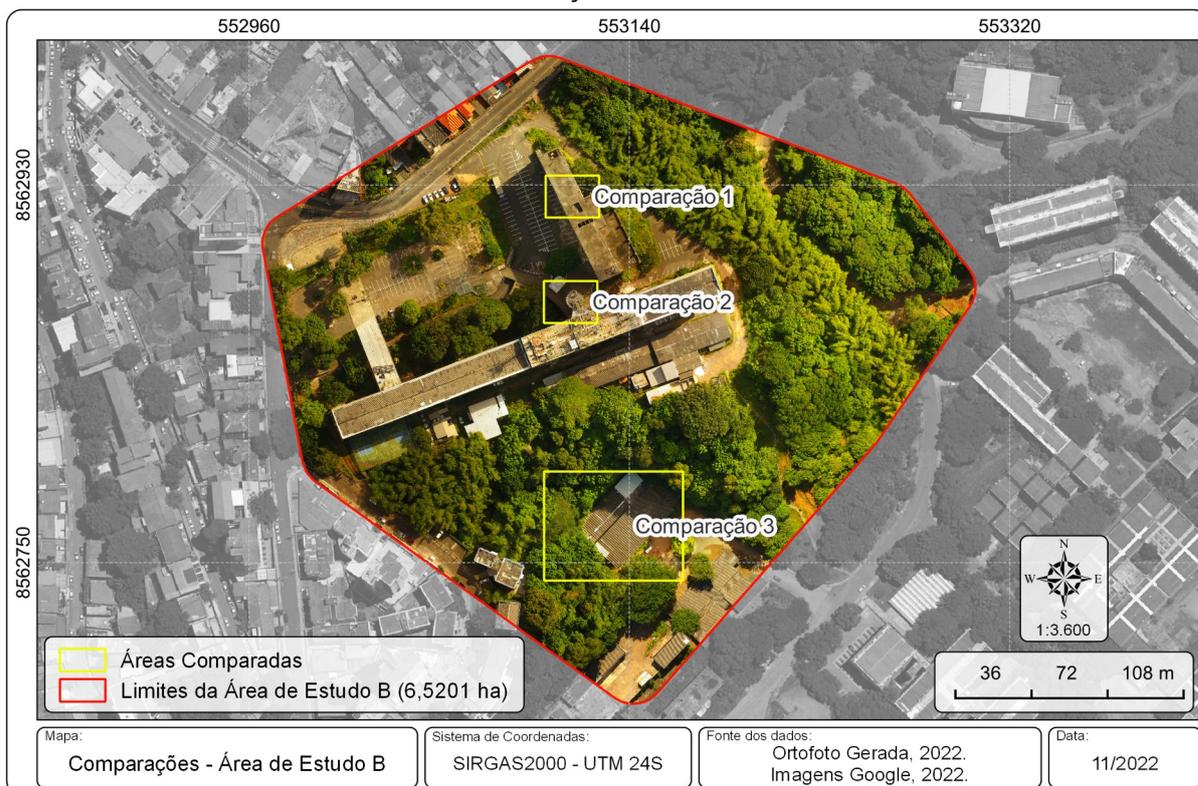


FONTE: O autor (2022).

Nas três comparações nota-se que as 3 ortofotos apresentam resultados semelhantes, entretanto a borda das edificações apresenta maior distorção no ortomosaico gerado pelo programa livre.

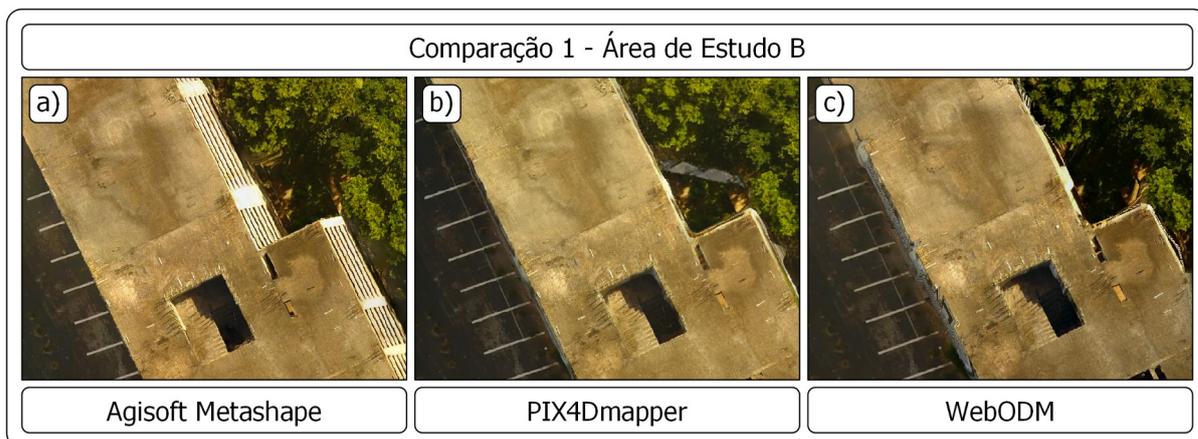
A mesma comparação foi realizada na área de estudo B, e pode ser visualizada nas FIGURAS 32, 33, 34 e 35.

FIGURA 31 – COMPARAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO B



FONTE: O autor (2022).

FIGURA 32 – COMPARAÇÃO 1 DA ÁREA DE ESTUDO B



FONTE: O autor (2022).

Na primeira comparação da área de estudo B nota-se na FIGURA 33a que a ortofoto gerada pelo Metashape não realizou corretamente o processo de ortoretificação do prédio anexo à Escola Politécnica da UFBA e o WebODM (FIGURA 33c) manteve o padrão de distorções na região de borda das edificações. Nesta região da ortofoto, o software que apresentou melhor qualidade de reconstrução foi o PIX4D.

FIGURA 33 – COMPARAÇÃO 2 DA ÁREA DE ESTUDO B



FONTE: O autor (2022).

Na comparação 2 (FIGURA 34), nota-se um elevado nível de distorção nas 3 imagens, sendo na a) um erro de ortoretificação (visualização da lateral do elemento), a segunda irregularidades na borda da edificação e na FIGURA 34c algumas distorções que descaracterizam a borda da Escola Politécnica.

FIGURA 34 – COMPARAÇÃO 3 DA ÁREA DE ESTUDO B



FONTE: O autor (2022).

Por último, a edificação identificada na FIGURA 35 foi parcialmente desconfigurada na ortofoto gerada pelo Metashape, teve algumas distorções de borda no WebODM e foi melhor representada no PIX4Dmapper.

4.3 ACURÁCIA POSICIONAL

Para a avaliação da acurácia posicional, o primeiro passo foi comparar as coordenadas dos pontos de checagem coletados em ambiente SIG referentes às 6 ortofotos com os pontos coletados *in loco*, todas as coordenadas encontram-se descritas no apêndice. A partir desta avaliação, foram calculadas as discrepâncias referentes a cada área de estudo para cada software avaliado. Na TABELA 7 podem ser vistas as discrepâncias referentes a ortofoto gerada pelo Metashape na área de estudo A, e

TABELA 7 – DISCREPÂNCIAS (m) NA ÁREA A – AGISOFT METASHAPE

Ponto	Δ Este (ΔX)	Δ Norte (ΔY)	Δ Horizontal (ΔHz)
CHA1	0,027	0,009	0,029
CHA2	0,000	0,012	0,012
CHA3	0,013	0,003	0,013
CHA4	0,109	0,077	0,134
CHA5	0,014	-0,016	0,021
CHA6	-0,041	-0,012	0,043
CHA7	-0,005	0,009	0,010

FONTE: O autor (2022).

Já a TABELA 8 mostra os valores encontrados para o produto gerado pelo PIX4D para a mesma área.

TABELA 8 – DISCREPÂNCIAS (m) NA ÁREA A – PIX4DMAPPER

Ponto	Δ Este (ΔX)	Δ Norte (ΔY)	Δ Horizontal (ΔHz)
CHA1	0,037	0,011	0,039
CHA2	0,011	0,025	0,027
CHA3	0,006	0,019	0,020
CHA4	0,095	0,108	0,144
CHA5	0,000	0,001	0,001
CHA6	-0,015	0,017	0,017
CHA7	0,008	0,020	0,020

FONTE: O autor (2022).

Já a TABELA 9 mostra os valores encontrados para o produto gerado pelo WebODM para a mesma área.

TABELA 9 – DISCREPÂNCIAS (m) NA ÁREA A – WEBODM

Ponto	ΔEste (ΔX)	ΔNorte (ΔY)	ΔHorizontal (ΔHz)
CHA1	-0,031	0,052	0,061
CHA2	0,018	0,082	0,084
CHA3	-0,013	0,045	0,047
CHA4	0,115	0,126	0,171
CHA5	-0,006	0,004	0,007
CHA6	0,023	0,007	0,024
CHA7	0,054	0,002	0,054

FONTE: O autor (2022).

A mesma lógica foi aplicada na área de estudo B, demonstrando as discrepâncias encontradas na TABELA 10 (Metashape), TABELA 11 (PIX4D) e TABELA 12 (WebODM).

TABELA 10 – DISCREPÂNCIAS (m) NA ÁREA B – AGISOFT METASHAPE

Ponto	ΔEste (ΔX)	ΔNorte (ΔY)	ΔHorizontal (ΔHz)
CHB1	-0,115	-0,058	0,129
CHB2	-0,266	0,004	0,266
CHB3	0,016	-0,116	0,117
CHB4	-0,630	-0,199	0,661
CHB5	0,790	-0,319	0,852
CHB6	0,611	0,202	0,644

FONTE: O autor (2022).

TABELA 11 – DISCREPÂNCIAS (m) NA ÁREA B – PIX4DMAPPER

Ponto	ΔEste (ΔX)	ΔNorte (ΔY)	ΔHorizontal (ΔHz)
CHB1	0,172	-0,068	0,185
CHB2	0,269	0,057	0,275
CHB3	0,222	-0,054	0,229
CHB4	0,284	-0,033	0,286
CHB5	0,423	-0,547	0,692
CHB6	0,369	0,035	0,371

FONTE: O autor (2022).

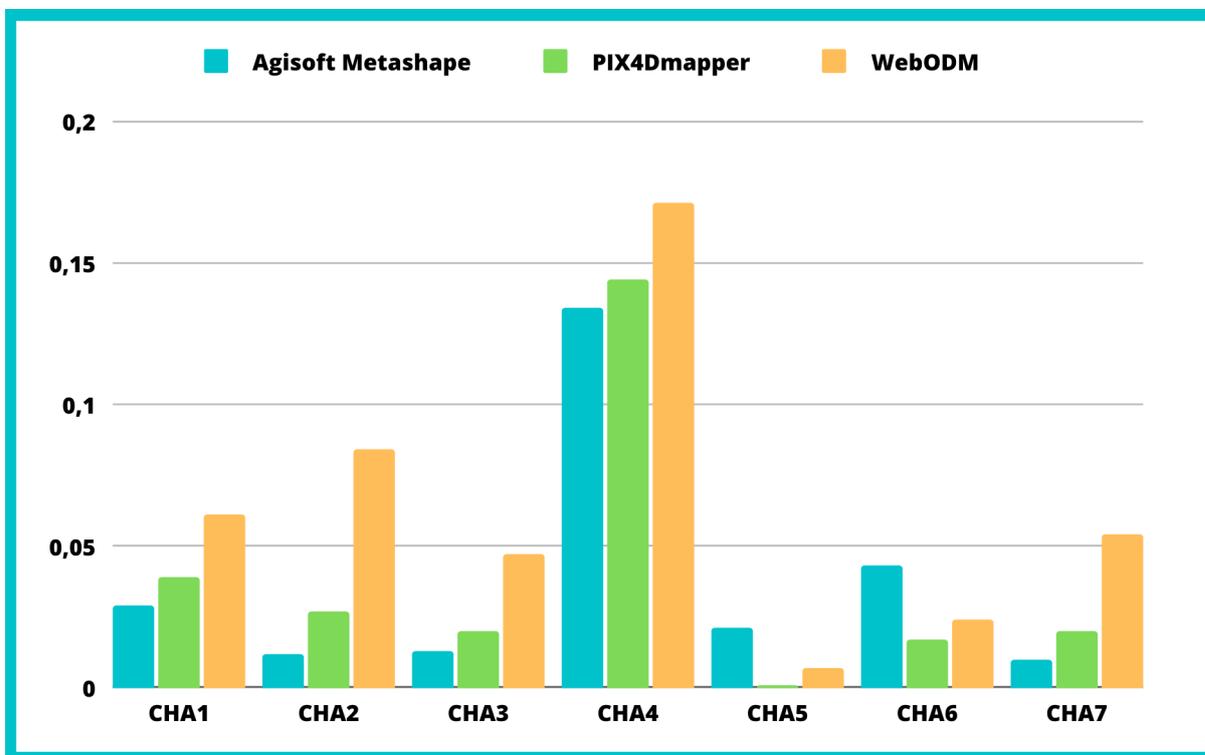
TABELA 12 – DISCREPÂNCIAS (m) NA ÁREA B – WEBODM

Ponto	ΔEste (ΔX)	ΔNorte (ΔY)	ΔHorizontal (ΔHz)
CHB1	0,371	-0,191	0,417
CHB2	0,486	0,076	0,492
CHB3	0,303	-0,042	0,306
CHB4	1,402	-1,599	1,909
CHB5	0,642	-0,463	0,792
CHB6	0,410	0,210	0,461

FONTE: O autor (2022).

As discrepâncias da área de estudo A são ilustradas no GRÁFICO 4.

GRÁFICO 4 – DISCREPÂNCIAS HORIZONTAIS NA ÁREA A (METROS)

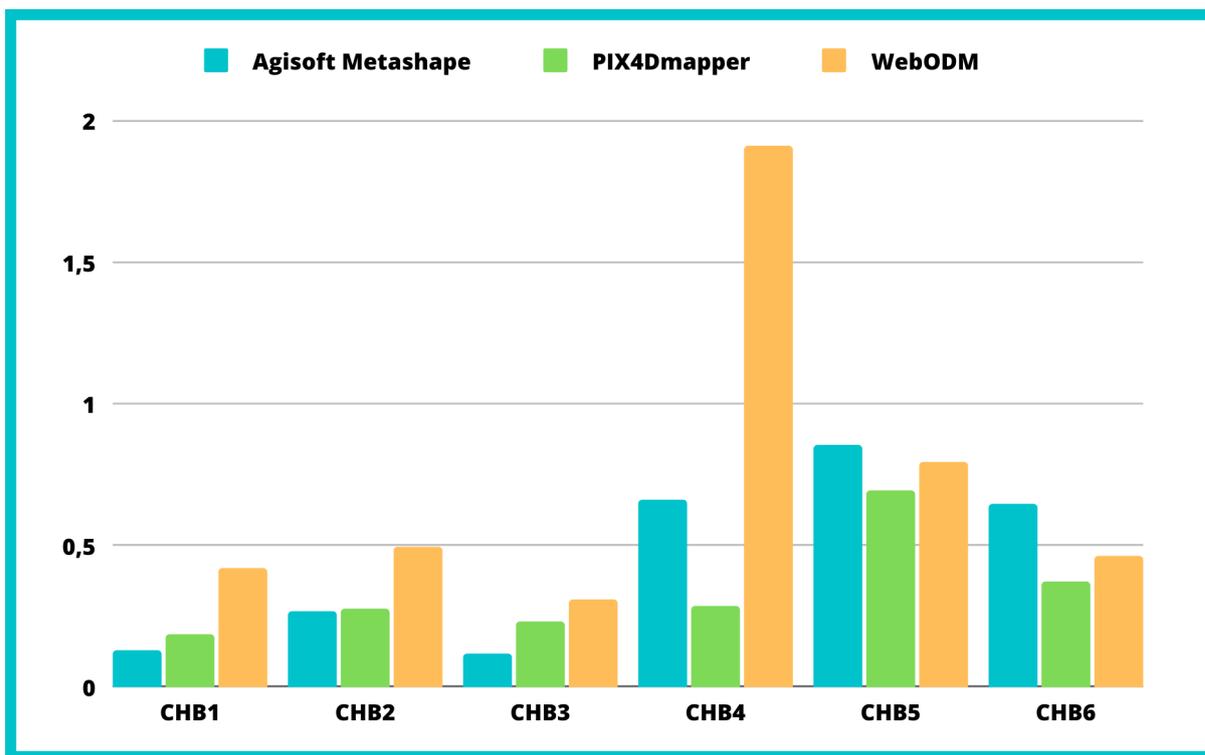


FONTE: O autor (2022).

Nota-se que o ponto com maiores discrepâncias foi o CH4, bem como o que obteve as menores diferenças foi o CH5. Percebe-se também que em 5 dos 7 pontos a ortofoto gerada pelo WebODM obteve os maiores valores apesar de não terem excedido o valor de 18 cm.

Já na área de estudo B (GRÁFICO 5), podemos notar que os valores gerais de discrepância foram consideravelmente maiores que a área de estudo A, onde a maior diferença se deu no ponto CH4 referente a ortofoto gerada no software livre e a menor no ponto CH3 da ortofoto do Agisoft Metashape. O aumento das discrepâncias pode ter sido ocasionado pela característica da área de estudo B, onde estão presentes edificações altas em um relevo com grande variação de altitude.

GRÁFICO 5 – DISCREPÂNCIAS HORIZONTAIS NA ÁREA B (METROS)



FONTE: O autor (2022).

Através das referidas discrepâncias, as ortofotos foram classificadas de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Pode-se verificar o resultado desta avaliação no QUADRO 8.

QUADRO 8 – RESULTADO DE TESTES ESTATÍSTICOS E PEC-PCD

Ortofoto	Normalidade	Tendência	Escala Classe A	Escala Classe B
Área A Metashape	Não	Não (média direcional)	1:1.000	1:1.000
Área A PIX4D	Não	Sim (média direcional)	1:1.000	1:1.000
Área A WebODM	Sim	Sim (t-student e média direcional)	1:1.000	1:1.000
Área B Metashape	Sim	Não (t-student e média direcional)	1:5.000	1:2.000
Área B PIX4D	Não	Sim (média direcional)	1:5.000	1:2.000
Área B WebODM	Sim	Sim (t-student e média direcional)	1:10.000	1:5.000

FONTE: O autor (2022).

4.4 TESTES DE HIPÓTESES

Para esta etapa, as discrepâncias dos 2 softwares comerciais foram estatisticamente comparadas com as do WebODM através do teste t de Student para amostras pareadas.

A hipótese nula (H_0) considerada nas 4 comparações (QUADRO 9) foi a que as discrepâncias encontradas nas ortofotos geradas pelo WebODM são estatisticamente iguais às comparadas, e a hipótese alternativa (H_1) considera que os valores encontrados no WebODM são maiores que os do software em comparação.

QUADRO 9 – COMPARAÇÕES ENTRE AS DISCREPÂNCIAS

Softwares	Área de Estudo
WebODM x Metashape	A
WebODM x Metashape	B
WebODM x PIX4D	A
WebODM x PIX4D	B

FONTE: O autor (2022).

4.4.1 WebODM x Agisoft Metashape

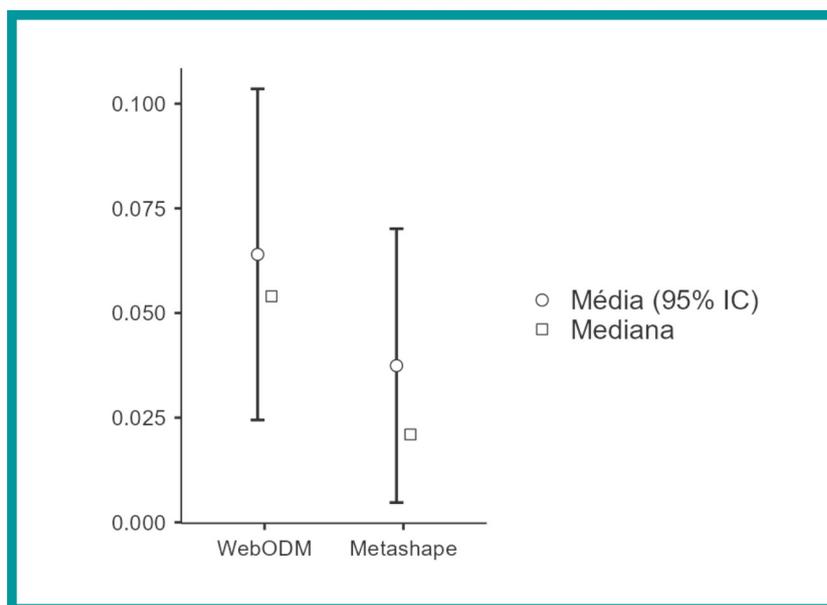
Para a área de estudo A, inicialmente foram avaliados os parâmetros descritivos definidos na TABELA 13 e podem ser vistos no GRÁFICO 6.

TABELA 13 – ESTATÍSTICA WEBODM X METASHAPE NA ÁREA A

Software	Número de Pontos	Média	Mediana	Desvio-padrão
WebODM	7	0,064	0,054	0,053
Metashape	7	0,037	0,021	0,044

FONTE: O autor (2022).

GRÁFICO 6 – BOX-PLOT WEBODM X METASHAPE NA ÁREA A



FONTE: O autor (2022).

Ao implementar o teste t de Student para amostras pareadas na comparação entre o WebODM e o Metashape na área de estudo A, foi encontrado o resultado de 0,036 para a função probabilidade (p) o que, ao considerar um nível de confiança de 95%, descarta a hipótese nula e considera a hipótese alternativa. Portanto, na área de estudo A as discrepâncias do WebODM se mostraram estatisticamente superiores às encontradas pelo Metashape.

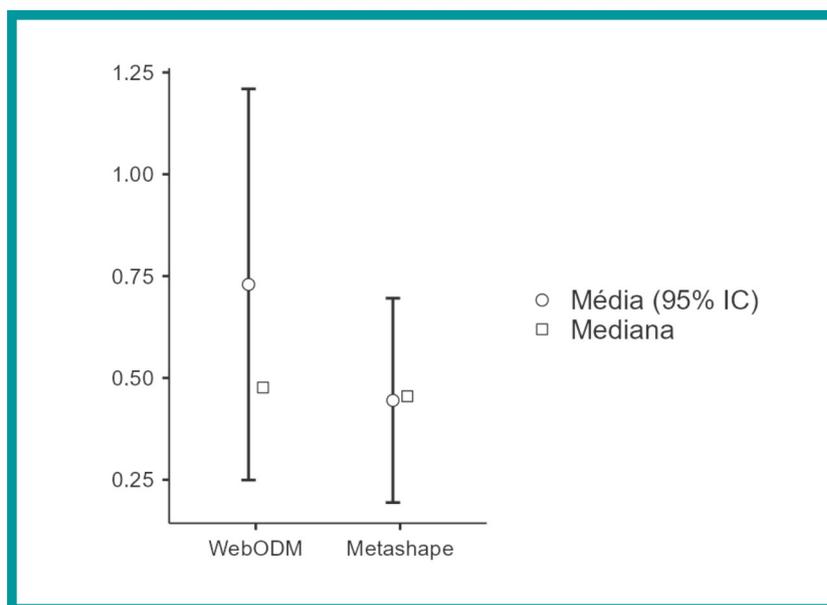
Na área de estudo B, os parâmetros descritivos estão definidos na TABELA 14 e podem ser vistos no GRÁFICO 7.

TABELA 14 – ESTATÍSTICA WEBODM X METASHAPE NA ÁREA B

Software	Número de Pontos	Média	Mediana	Desvio-padrão
WebODM	6	0,730	0,477	0,600
Metashape	6	0,445	0,455	0,313

FONTE: O autor (2022).

GRÁFICO 7 – BOX-PLOT WEBODM X METASHAPE NA ÁREA B



FONTE: O autor (2022).

Como resultado do teste t Student pareado para o segundo conjunto de dados obteve-se como resultado da função probabilidade o valor de 0,113, o que não descarta a hipótese H_0 e indica que os dados são estatisticamente semelhantes. Portanto, neste caso não é possível inferir que as discrepâncias foram maiores no WebODM.

4.4.2 WebODM x PIX4D

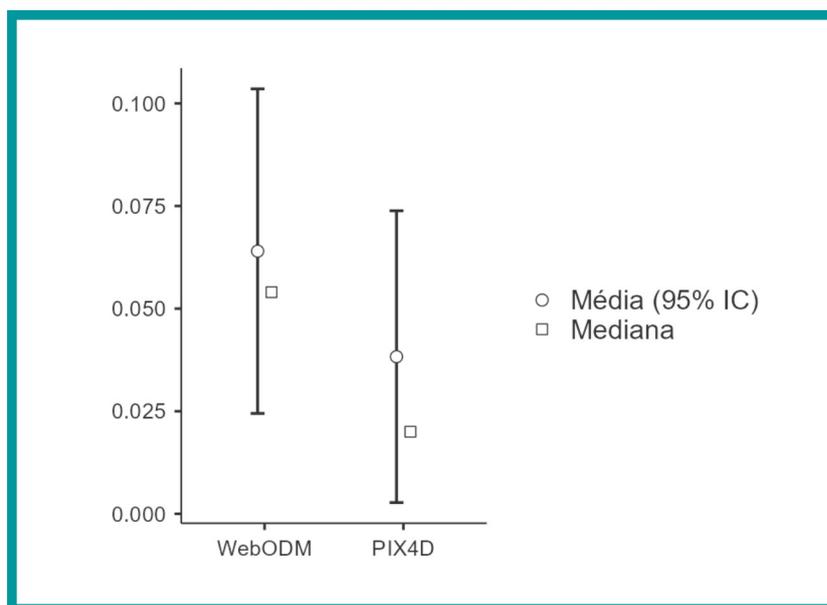
A mesma lógica considerada para comparar o WebODM e o Metashape foi adotada para os dados colhidos referentes ao PIX4D, desta forma, na área de estudo A foram encontrados os parâmetros exploratórios descritos na TABELA 15 e no GRÁFICO 8.

TABELA 15 – ESTATÍSTICA WEBODM X PIX4D NA ÁREA A

Software	Número de Pontos	Média	Mediana	Desvio-padrão
WebODM	7	0,064	0,054	0,053
PIX4D	7	0,038	0,020	0,048

FONTE: O autor (2022).

GRÁFICO 8 – BOX-PLOT WEBODM X PIX4D NA ÁREA A



FONTE: O autor (2022).

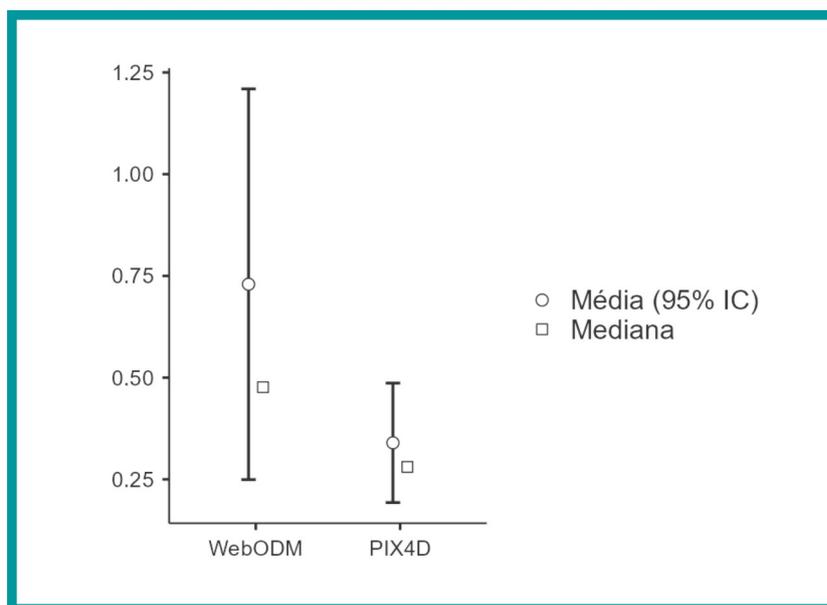
Nesta avaliação, o resultado da função probabilidade resultou no valor de 0,004, o que a um nível de confiança de 95% permite inferir que os erros encontrados no WebODM foram superiores aos encontrados no PIX4D. Na área de estudo B, os parâmetros descritivos das discrepâncias estão definidos na TABELA 16 e podem ser vistos no GRÁFICO 9.

TABELA 16 – ESTATÍSTICA WEBODM X PIX4D NA ÁREA B

Software	Número de Pontos	Média	Mediana	Desvio-padrão
WebODM	6	0,730	0,477	0,245
PIX4D	6	0,340	0,280	0,075

FONTE: O autor (2022).

GRÁFICO 9 – BOX-PLOT WEBODM X PIX4D NA ÁREA B



FONTE: O autor (2022).

Ao avaliar o teste t de Student pareado, foi encontrado o valor de 0,088 para a função probabilidade, o que indica que não existem diferenças estatísticas entre os 2 dados a um nível de confiança de 95%. Vale ressaltar que se fosse considerado um nível de confiança de 90% o resultado se mostraria diferente.

4.4.3 Panorama dos testes de hipóteses

É possível visualizar de forma mais objetiva o resultado dos testes de hipóteses no QUADRO 10.

QUADRO 10 – TESTES DE HIPÓTESES

Softwares	Área de Estudo	p	Hipótese Aceita	Discrepâncias
WebODM x Metashape	A	0,036	H ₁	ODM > Meta
WebODM x Metashape	B	0,113	H ₀	ODM = Meta
WebODM x PIX4D	A	0,004	H ₁	ODM > PIX4D
WebODM x PIX4D	B	0,088	H ₀	ODM = PIX4D

FONTE: O autor (2022).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de RPAs para a finalidade de aerolevantamentos tem se universalizado em diversos campos de atuação na engenharia, e a etapa de processamento dos dados é uma atividade inerente a este tipo de trabalho. Por este motivo, diversas soluções computacionais foram criadas com essa finalidade e em sua maior parte de característica comercial. Isto cria uma barreira inicial de acesso a este método de aquisição de dados pois nem sempre é viável adquirir a licença destes *softwares*. Buscando suprir esta demanda, algumas soluções da iniciativa *open source* foram desenvolvidas e estão disponíveis para serem utilizadas sem a obrigatoriedade da compra de uma licença. Um destes softwares é o *Open Drone Map* (WebODM).

Este trabalho teve como objetivo comparar os resultados obtidos através da geração de ortofotos em 2 soluções comerciais (Agisoft Metashape e PIX4Dmapper) frente aos resultados obtidos pela solução livre (WebODM).

Para se atingir o resultado desta avaliação, definiu-se seis objetivos (a, b, c, d, e, e f) específicos que foram avaliados em 2 áreas de estudo: Loteamento localizado em Aracaju (área A) e Escola Politécnica da UFBA (área B). O objetivo a) refere-se a aquisição *in loco* dos conjuntos de imagens, e foi atingido integralmente ao coletar 280 imagens em Aracaju para a área A e ao receber o conjunto de 428 imagens coletadas anteriormente na área de estudo B. O objetivo b) foi a aquisição dos pontos precisos que foram utilizados para controle e checagem, que também foi atingido ao coletar os dados em Aracaju determinando as coordenadas de 14 pontos e, para a área de estudo B, ao utilizar os dados levantados anteriormente na UFBA com a complementação de alguns pontos que foram colhidos no presente trabalho determinando as coordenadas de 12 pontos.

O objetivo específico c) refere-se ao processamento dos conjuntos de imagens nos diferentes softwares nas duas áreas de estudo, que foi atingido com o uso de licenças de testes, no caso dos softwares comerciais, e da licença gratuita do WebODM gerando 6 ortofotos que foram utilizadas nas demais análises. Vale ressaltar que, por conta da grande demanda por memória RAM do software WebODM, foi necessário realizar uma redução do tamanho das imagens antes de

iniciar os processamentos, o que resultou em um GSD maior que as soluções comerciais em ambas as áreas de estudo.

O objetivo d) foi a quantização e comparação do tempo de processamento nos diferentes software, que mostrou que o Agisoft Metashape obteve um tempo de processamento muito maior que os demais e demonstrou também uma leve vantagem do WebODM frente ao PIX4D.

A quinta avaliação, o objetivo e), foi baseada em analisar isoladamente a qualidade posicional das 6 ortofotos geradas através da classificação quanto ao Padrão de Exatidão Cartográfico para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) e da avaliação da existência de tendências nos dados. O resultado obtido foi que a ortofoto gerada pelo Metashape na área de estudo A obteve nivelamento classe A na escala 1:1.000 e a ortofoto gerada na área de estudo B obteve conceito classe B na escala 1:2.000 e classe A na escala 1:5.000. Nos dados gerados pelo PIX4D, as classificações obtidas nos produtos foram semelhantes às do Metashape, obtendo conceito classe A na escala 1:1.000 na área de estudo A e classe B 1:2.000, classe A 1:5.000 na área de estudo B. Já o WebODM obteve resultados similares na área de estudo A, e inferiores na área de estudo B. Sendo a sua ortofoto referente a área de estudo A classificada como Classe A 1:1.000 e na área de estudo B classe B 1:5.000 e Classe A 1:10.000. As ortofotos geradas também foram comparadas de forma visual em 3 regiões de interesse em cada área de estudo, o que mostrou que as distorções em regiões de borda de edificações estão presentes nas ortofotos geradas pelo WebODM na área A, e na área B o Metashape apresentou mais distorções que os demais.

Por último, o objetivo f) foi comparar estatisticamente as discrepâncias encontradas a partir das ortofotos dos softwares comerciais com as encontradas na solução livre através do teste t de Student para amostras pareadas a um nível de confiança de 95%. Para tal, foi considerada como hipótese nula (H_0) a igualdade entre as discrepâncias e a hipótese alternativa (H_1) considera que os erros são maiores no WebODM. Tal avaliação demonstrou que na área de estudo A as discrepâncias encontradas no Metashape e no PIX4D foram estatisticamente inferiores às encontradas no WebODM e na área de estudo B a hipótese nula foi aceita, inferindo que os valores são estatisticamente semelhantes para o nível de confiança considerado. Essa diferença pode ter se dado pela diferença entre os

parâmetros de voo e equipamentos utilizados somados às diferentes condições de relevo entre as duas áreas de estudos.

Desta forma, ao avaliar as ortofotos geradas a partir dos dois conjuntos de imagens utilizados pode-se inferir que os resultados gerados pelo WebODM se mostraram satisfatórios, porém inferiores às soluções comerciais estatisticamente na área A e através da classificação PEC-PCD na área B. Nota-se também que na área A, uma região de relevo aproximadamente plano, o produto gerado pela solução livre atingiu qualidade suficiente para ser qualificado como classe A para a escala 1:1.000 e na área de estudo B, região de relevo variado, obteve classe B para a escala 1:5.000. Recomenda-se pesquisas semelhantes em mais condições de voo, áreas de estudo e equipamentos para ampliar o leque de conclusões.

5.1 DIFICULDADES ENCONTRADAS

No processo de elaboração do presente trabalho, alguns obstáculos foram encontrados. Sendo eles:

1. Ausência de RPA próprio no Laboratório de Instrumentação Topográfica, que foi superado com a utilização do equipamento pertencente à prefeitura de Aracaju na Área A e com a utilização dos dados coletados pelo Eng. Elmo Bispo em seu trabalho de conclusão de curso.

2. Limitações de armazenamento no computador voltado a processamentos no Laboratório de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, que foi superado com a utilização de computador pessoal.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das experiências vivenciadas com a elaboração deste trabalho, notaram-se demandas para a elaboração de trabalhos futuros com esta temática. Dentre elas, podemos listar:

1. Utilização de máquina com maior poder computacional para avaliar o uso de memória RAM ao longo do processamento nos diferentes softwares sem o uso de redimensionamento;
2. Implementação no código fonte do WebODM de ferramenta de estimativa de uso de memória RAM, bem como de tempo de processamento;
3. Avaliação da Área de Estudo B com uma altitude de voo, e sobreposições longitudinais e laterais semelhantes à área de estudo A;
4. Análise do comportamento dos diferentes softwares ao utilizar conjuntos com maior quantidade de imagens;
5. Avaliação dos dados altimétricos gerados a partir dos diferentes softwares (MDS, MDT e curvas de nível)

REFERÊNCIAS

AMORIM, N. C. DE. Avaliação do desempenho da técnica structure from motion para mapeamento de corredores. 2020.

COELHO, L.; BRITO, J. N. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: EDUERJ, 2007.

JÚNIOR, A.; RUFINO, L. Análise de produtos cartográficos obtidos com câmera digital não métrica acoplada a um veículo aéreo não tripulado em áreas urbanas e rurais no estado de Goiás. 13 mar. 2015.

FRANCO, G. G.; NAIME, A. F. Structure from Motion (SFM) – Uma Breve Revisão Histórica, Aplicações nas Geociências e Perspectivas Futuras. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, n. 0, 22 out. 2021.

MENDES PITOMBEIRA, K.; ADERSON DOS REIS FILHO, A. Geração e análise de produtos cartográficos por fotogrametria com o uso de structure from motion – multi view stereo. 3 ago. 2020.

MAGELLA, P. E. A. DE. A operação de aeronaves remotamente pilotadas e a segurança do espaço aéreo. 2016.

PARK, J. W. et al. Development of Open source-based automatic shooting and processing UAV imagery for Orthoimage Using Smart Camera UAV. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLI-B7, p. 941–944, 22 jun. 2016.

SANTOS, A. DE P. DOS et al. AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL EM DADOS ESPACIAIS UTILIZANDO TÉCNICAS DE ESTATÍSTICA ESPACIAL: PROPOSTA DE MÉTODO E EXEMPLO UTILIZANDO A NORMA BRASILEIRA. **Bulletin of Geodetic Sciences**, v. 22, n. 4, 7 dez. 2016.

FRANCO, G. G.; NAIME, A. F. Structure from Motion (SFM) – Uma Breve Revisão Histórica, Aplicações nas Geociências e Perspectivas Futuras. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, n. 0, 22 out. 2021.

RUY, R. DA S. [UNESP. Desenvolvimento e validação geométrica de um sistema para mapeamento com câmeras digitais de médio formato. **Aleph**, p. 239 p. : il., 19

nov. 2008. WESTOBY, M. J. et al. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300–314, 15 dez. 2012.

EVANGELISTA, R. O movimento software livre do Brasil: política, trabalho e hacking. **Horizontes Antropológicos**, v. 20, p. 173–200, jun. 2014.

SILVEIRA, S. A. DA. Software livre. 7 set. 2018.

CAMPOS, C. H. DE. **Uso de imagens obtidas por aeronave remotamente pilotada (RPA) no monitoramento da cultura do feijão (Phaseolus Vulgaris)**. bachelorThesis—[s.l.] Agronomia, 7 maio 2021.

PLICHTA, A.; MICHAŁ, W.-J.; WYCZAŁEK, I. GRAPHICAL PART OF LAND AND BUILDINGS REGISTRY BASED ON AERIAL PHOTOS FROM THE BOARD OF UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV). **Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Zielonogórskiego / Inżynieria Środowiska**, v. 165, p. 36–48, 3 abr. 2017.

SANTOS, L. R. L. Uso da geotecnologia RPA no acompanhamento de obras e projetos em diversas áreas da engenharia civil. 20 abr. 2021.

CECCON, L. R. Legislação de aeronaves remotamente pilotadas no Brasil. 2018.

GUIMARÃES, P. R. B. Métodos Quantitativos Estatísticos. p. 64, 2007.

TRIOLA, Mário F. Introdução à Estatística. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

DEBIASI, P.; HAINOSZ, F.; MITISHITA, E. A. Calibração em serviço de câmara digital de baixo custo com o uso de pontos de apoio altimétrico. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 18, p. 225–241, jun. 2012.

CHOW, J. C. K.; LICHTI, D. D. Photogrammetric Bundle Adjustment With Self-Calibration of the PrimeSense 3D Camera Technology: Microsoft Kinect. **IEEE Access**, v. 1, p. 465–474, 2013.

DERPANIS, K. G. Overview of the RANSAC Algorithm. p. 2, [s.d.].

ESPINHOSA, D. R. S. EFEITOS DA INJUNÇÃO DA BASE NAS ORIENTAÇÕES INTERIOR E EXTERIOR E NAS COORDENADAS DO ESPAÇO OBJETO EM IMAGENS OBTIDAS COM A ESTÉREO VÍDEO-CÂMARA DE UM SISTEMA MÓVEL DE MAPEAMENTO. **Bol. Ciênc. Geod.**, v. 14, n. 4, p. 20, [s.d.].

PERES, A. B. Aerotriangulação por faixa e em bloco, por aplicação de software especialista, com medições de coordenadas fotográficas em mesa digitalizadora. 11

maio 2007.

SCHONBERGER, J. L.; FRAHM, J.-M. **Structure-From-Motion Revisited**. . Em: PROCEEDINGS OF THE IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION. 2016. Disponível em: <https://www.cv-foundation.org/openaccess/content_cvpr_2016/html/Schonberger_Structure-From-Motion_Revisited_CVPR_2016_paper.html>. Acesso em: 8 dez. 2022

ZHANG, J.; CHEN, G.; JIA, Z. An Image Stitching Algorithm Based on Histogram Matching and SIFT Algorithm. **International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence**, v. 31, n. 04, p. 1754006, abr. 2017.

DUARTE, R. T. Avaliação da qualidade de produtos obtidos por RPAS tipo asa fixa e processado em software livre e comercial. 8 fev. 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE AGRIMENSURA E CARTOGRÁFICA

ENGJ43 - TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO II
FICHA DE AVALIAÇÃO

ALUNO: RAUL MAGNO NEVES DA SILVA	
TÍTULO: AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES COMPUTACIONAIS PARA O PROCESSAMENTO DE DADOS PROVENIENTES DA TECNOLOGIA RPA: COMERCIAL VERSUS LIVRE	
ORIENTADOR(A):	FABIANO PEIXOTO FREIMAN
AVALIADOR(A) 1:	JORGE FELIPE EURIQUES
AVALIADOR(A) 2:	SUZANA DANIELA ROCHA SANTOS E SILVA

Avaliação da Banca

	ORIENTADOR E	AVALIADOR 1	AVALIADOR 2
Conceito por avaliador	APROVADO	APROVADO	APROVADO

Conceito final da banca: (X) APROVADO(A) () REPROVADO(A) () Aprovação condicionada ao atendimento das observações

Salvador, 13 de Dezembro de 2022,

 Documento assinado digitalmente
FABIANO PEIXOTO FREIMAN
Data: 08/02/2023 17:51:00-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Assinatura do Orientador (UFBA)

 Documento assinado digitalmente
JORGE FELIPE EURIQUES
Data: 09/02/2023 17:53:34-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Assinatura do Avaliador(a) 1 (UFRRJ)

 Documento assinado digitalmente
SUZANA DANIELA ROCHA SANTOS E SILVA
Data: 10/02/2023 11:10:17-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Assinatura do Avaliador(a) 2 (UFBA)