



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

SILAS LEONARDO DIAS VASCONCELOS

**APLICAÇÃO DO LEVANTAMENTO AÉREO COM VANT EM MINA DE
PEQUENO PORTE**

Recife

2019

SILAS LEONARDO DIAS VASCONCELOS

**APLICAÇÃO DO LEVANTAMENTO AÉREO COM VANT EM MINA DE
PEQUENO PORTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de Concentração: Minerais Industriais

Orientador: Prof. Dr. Júlio César de Souza

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

V331a Vasconcelos, Silas Leonardo Dias.
Aplicação do levantamento aéreo com VANT em mina de pequeno porte/
Silas Leonardo Dias Vasconcelos – Recife, 2019.
90 f.: figs., tabs., abrev. e siglas.

Orientador: Prof. Dr. Júlio César de Souza.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2019.
Inclui referências.

1. Engenharia Mineral. 2. VANT. 3. Mineração. 4. Modelo digital. 5. I. Souza, Júlio César de (Orientador). II. Título.

UFPE

623.35 CDD (22. ed.) BCTG / 2020-206

SILAS LEONARDO DIAS VASCONCELOS

**APLICAÇÃO DO LEVANTAMENTO AÉREO COM VANT EM MINA DE
PEQUENO PORTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Aprovada em: 20 /12 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Júlio César de Souza(Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Robson Ribeiro Lima (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Márcio Luiz de Siqueira Campos Barros (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha família, noiva, amigos e todos que acreditaram em mim, em especial aos meus pais, Maria Luiza Dias Vasconcelos e Severino Ramos Vasconcelos de Lima, que nunca me deixaram desistir e possibilitaram a realização dessa conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela minha vida e saúde concedida durante esses anos, tornando essa conquista possível, sempre sendo meu suporte e esperança.

Aos meus pais, Maria Luiza Dias Vasconcelos e Severino Ramos Vasconcelos de Lima, a quem pertence o mérito dessa conquista, por sempre me apoiar, incentivar e fornecer todo suporte psicológico necessário durante esta etapa.

A minha noiva, Elizabete Regina Silva Lucena dos Santos, por sempre se fazer presente no meu dia a dia, sempre sendo compreensiva e amiga em todos os momentos, ajudando a superar as dificuldades encontradas.

Aos colegas, amigos e funcionários do Departamento de Engenharia de Minas/UFPE, por todas as experiências compartilhadas, em especial, Jose Jairo de Melo e Cecilia Costa Holanda.

Aos suporte técnico fornecido pelo Departamento de Engenharia Cartográfica/UFPE, que sempre se mostrou solícito ao ser acionado, em especial para o técnico Leonardo Carlos Barbosa, que disponibilizou de seu tempo para me auxiliar em diversas situações.

Aos docentes do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco, que nunca mediram esforços para promover meu desenvolvimento como pesquisador.

Ao Laboratório de Planejamento de Lavra (LAPLA), constituído por Suelen Silva Rocha, Mayra Mykaella Mendes Wanderley, Augusto Marçal Alves de Barros, Claudson da Silva da Ferreira Júnior e Gabriel Filinkoski, por sempre tornar os dias mais agradáveis e transformar a rotina em uma experiência singular.

Ao meu orientador Prof. Dr. Júlio César de Souza, que me permitiu um grande crescimento acadêmico, intelectual e profissional. Obrigada por todas as oportunidades, o incentivo, a confiança, apoio, paciência e durante todo o mestrado.

À Pedreira Esperança por disponibilizar sua cava como principal base de dados, em especial ao Engenheiro de Minas, Jorge Luiz Valença Mariz, pelo apoio e infinita disponibilidade em auxiliar no projeto.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

A aplicação de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) em empreendimentos mineiros é uma forma inovadora no que diz respeito à obtenção de informações de caráter imediato. Apesar de essa ferramenta já estar consolidada nas regiões sul e sudeste, no estado de Pernambuco ainda é vista com certa desconfiança pelas empresas do setor, assim como também pelos órgãos públicos atuantes. Nesse trabalho foram avaliadas diversas aplicações da aeronave remotamente pilotada como ferramenta de planejamento e controle em uma mina. Foram comparadas as vantagens e desvantagens do levantamento topográfico tradicional e o levantamento obtido por meio do VANT e também as etapas da construção do modelo digital através da fotogrametria e seu potencial como fonte de informações. Foi utilizada uma Pedreira como campo de estudo onde foi realizado diversos experimentos. Além disso, foram realizados vários levantamentos aéreos para avaliar diversas aplicações distintas, tais como a análise granulométrica das pilhas de material desmontado, determinação de áreas e distâncias, determinação de volumes e elaboração de mapas topográficos planialtimétricos. Na análise topográfica foram comparadas curvas de nível obtidas da forma tradicional com utilização de estação total e curvas de nível obtidas através do modelo digital (fotogrametria), em que foi constatado que o método aéreo supera a topografia convencional em todos os aspectos, tais como, qualidade, tempo e representatividade. Na análise volumétrica foi obtida uma diferença de aproximadamente 30% entre o volume calculado no modelo e o volume de produção obtido nos dados apresentados pela empresa de material extraído da mina. Na análise da fragmentação obtida no desmonte com explosivos, os resultados encontrados entre a fotogrametria de imagens aéreas foram similares ao resultado da fotogrametria das imagens terrestres, embora os resultados das imagens aéreas tenham sido sistematicamente mais grosseiros. Neste contexto, conclui-se que o uso de VANTs na mineração pode se tornar um recurso fundamental para o gerenciamento de minerações, desde que sejam desenvolvidos modelos e metodologias que mostrem efetivamente seu potencial em determinadas aplicações.

Palavras-chave: VANT. Mineração. Modelo digital.

ABSTRACT

The application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in mining projects is an innovative way with regard to obtaining information of an immediate character. Although this tool is already consolidated in the south and southeast regions, in the state of Pernambuco it is still viewed with some suspicion by the companies in the sector, as well as by the public agencies that operate. In this work, several applications of the remotely piloted aircraft as a planning and control tool in a mine were evaluated. The advantages and disadvantages of the traditional topographic survey and the survey obtained through the UAV were compared, as well as the stages of construction of the digital model through photogrammetry and its potential as a source of information. A quarry was used as a field of study where several experiments were carried out. In addition, several aerial surveys were carried out to evaluate different applications, such as the granulometric analysis of the disassembled material piles, determination of areas and distances, determination of volumes and preparation of planialtimetric topographic maps. In the topographic analysis, level curves obtained in the traditional way were compared with the use of a total station and level curves obtained through the digital model (photogrammetry), in which it was found that the aerial method surpasses the conventional topography in all aspects, such as, quality, time and representativeness. In the volumetric analysis, a difference of approximately 30% was obtained between the volume calculated in the model and the production volume obtained in the data presented by the company of material extracted from the mine. In the analysis of the fragmentation obtained in the disassembly with explosives, the results found between the photogrammetry of aerial images were similar to the result of the photogrammetry of terrestrial images, although the results of aerial images have been systematically more coarse. In this context, it is concluded that the use of UAVs in mining can become a fundamental resource for mining management.

Keywords: UAV. Mining. Digital model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de operação.....	21
Figura 2 -Teodolito modelo Xpex DE-2A (a) e a estação total modelo Topcon GTS-102N (b)	23
Figura 3 - Sistema GNSS.....	23
Figura 4 - Veículos aéreos não tripulados: multirrotor (a) e asa fixa (b).....	24
Figura 5 -Comparação da área de cobertura e frequência de atualização dos dados entre os métodos de obtenção de imagens	25
Figura 6 - Parâmetros para fotogrametria convencional.....	26
Figura 7 - Parâmetros da fotogrametria feita através de software.....	27
Figura 8 - Metodologia de obtenção de imagens.....	28
Figura 9 - Imagens sobrepostas	29
Figura 10 - Estrutura de plano de voo.....	30
Figura 11 - Empresas abertas especializadas em VANTs no Brasil.....	34
Figura 12 - Análise de lavoura de milho.....	34
Figura 13 - Imagem aérea de obra civil	35
Figura 14 - Bancada obtida por levantamento aéreo	36
Figura 15 - Fluxo de trabalho programado.....	38
Figura 16 - Localização de Pedreira Esperança.....	39
Figura 17 - Parâmetros das medidas dos pontos de controle (a) gráfico de referência para medida de “d” em metros em função da escala de voo (b).....	40
Figura 18 - Exemplo da obtenção do GSD para uma altura de voo de 80m em uma Phantom 4 advanced.....	41
Figura 19 - Altura da aeronave em relação ao relevo	42
Figura 20 - Diagrama do ponto de controle utilizado no projeto (a), imagem real do ponto de controle em campo (b)	42
Figura 21 - Ponto de controle pintado no solo	43
Figura 22 - Visualização do ponto de controle da imagem capturada pela aeronave a 120 metros de altura (a) e mesmo ponto com zoom de 400% (b).....	44
Figura 23 - Fluxograma das etapas para obtenção das coordenadas verdadeiras.....	44
Figura 24 - Levantamento dos pontos com receptor geodésico	45
Figura 25 - Interface do <i>softwarePix4D capture</i>	46

Figura 26 - Interface do <i>software Drone Deploy capture</i>	46
Figura 27 - Levantamento aéreo executado (a) e detalhamento das informações do voo (b)..	47
Figura 28 - Processo de alinhamento das imagens	48
Figura 29 - Alinhamento das imagens em “ <i>highest</i> ” (a) e alinhamento de qualidade média (b)	49
Figura 30 - Pontos de controle antes da correção (a) e ponto de controle após a correção (b)	50
Figura 31 - Nuvem densa da cava da Pedreira Esperança	50
Figura 32 - Nuvem densa classificada	51
Figura 33 - Modelo bruto (a) e modelo trabalhado (b)	52
Figura 34 - Modelo digital de elevação (MDE)	53
Figura 35 - Imagem ortomosaico da Pedreira Esperança	54
Figura 36 - Localização dos pontos de controle em cada versão	55
Figura 37 - Fluxograma da comparação entre o modelo retificado através dos PC e outro através das informações das imagens aéreas.....	56
Figura 38 - Linha e polígono construído no modelo da pedreira esperança de 2019	56
Figura 39 - Fluxograma para obtenção das curvas de nível.....	57
Figura 40 - Fluxograma da obtenção do volume da cava da Pedreira Esperança	57
Figura 41 - Modelo da Pedreira Esperança em dezembro de 2017 (a) e em janeiro de 2019 (b)	58
Figura 42 - Fluxograma da análise granulométrica por meio de imagens aéreas	59
Figura 43 - Imagem aérea obtida por meio do VANT (a) e imagem processada no <i>software Split-Desktop</i> de modo automático.....	59
Figura 44 - Imagem tomada no solo	60
Figura 45 - Imagem de solo avaliada pelo <i>software Split-Desktop</i>	60
Figura 46 - Fluxograma do levantamento aéreo da bancada.....	61
Figura 47 - Localização da bancada estudada	62
Figura 48 - <i>Phantom 4 advanced</i> e seus componentes	63
Figura 49 - Mapa com pontos de controle obtidos no primeiro levantamento.....	64
Figura 50 - Localização dos pontos de controle do segundo levantamento.....	65
Figura 51 - Localização dos pontos de controle do terceiro levantamento.....	66
Figura 52 - Ponto encoberto pela bancada (esquerda) e ponto localizado em sua posição correta (direita)	70

Figura 53 - Determinação da cava pelo método convencional (a) e determinação da cava com o VANT (b).....	74
Figura 54 - Curvas de nível brutas (a) e curvas de nível devidamente trabalhadas (b).....	75
Figura 55 - Contorno da crista da bancada.....	76
Figura 56 - Secção do modelo com pontos de controle (a) e secção do modelo sem pontos de controle (b).....	77
Figura 57 - Avanço da cava através da sobreposição dos modelos.....	78
Figura 58 - Secções dos modelos sobrepostos de 2017 e 2019.....	79
Figura 59 - Curva granulométrica da imagem obtida pelo VANT e pela metodologia tradicional.....	80
Figura 60 - Curvas granulométrica obtida pelo conjunto de imagens aéreas e convencionais	80
Figura 61 - Modelo digital da bancada	81
Figura 62 - Bancada com o plano de fogo	82
Figura 63 - Pontos do plano de fogo marcados com tinta.....	82
Figura 64 - Ortoimagem da face da bancada.....	83
Figura 65 - Detalhamento da área 1 (a) e detalhamento da área 2 (b).....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das aeronaves segundo a legislação brasileira.....	21
Tabela 2 - Padrão de Exatidão Cartográfica (planimetria).....	33
Tabela 3 - Padrão de Exatidão Cartográfica (altimetria)	33
Tabela 4 - Comparação entre os modelos da aeronave.....	39
Tabela 5 - Especificações da aeronave selecionada.....	64
Tabela 6 - Coordenadas do primeiro levantamento	65
Tabela 7 - Coordenadas do segundo levantamento	66
Tabela 8 - Coordenadas do terceiro levantamento	67
Tabela 9 - Distribuição dos pontos em grupos	67
Tabela 10 - Erros do modelo de 2018.....	68
Tabela 11 - Determinação do PEC para o modelo 2017.....	69
Tabela 12 - Erros do modelo de 2018.....	69
Tabela 13 - Determinação do PEC para o modelo 2018.....	70
Tabela 14 - Versão 1	71
Tabela 15 - Determinação do PEC para o modelo 2018.....	71
Tabela 16 - Versão 2.....	72
Tabela 17 - Versão 3	72
Tabela 18 - Comparação entre a topografia convencional e VANT	74
Tabela 19 - Comparação entre os modelos	76
Tabela 20 - Comparação entre as coordenadas verdadeiras (geodésico) com as do modelo corrigido.....	77
Tabela 21 - Comparação entre as coordenadas verdadeiras (geodésico) com as do modelo não corrigido.....	77
Tabela 22 - Coeficiente de uniformidade (setor).....	80
Tabela 23 - Coeficiente de uniformidade (Desmonte completo)	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicação
BVLOS	<i>Beyond Visual Line of Sight</i>
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
EP	Erro Padrão
EVLOS	<i>Extended Visual Line-Of-Sight</i>
GCP	<i>Ground Control Points</i>
GLONASS	<i>Globalnayanavigatsionnayaspunikovayasistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSD	<i>Ground sample Distance</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
NDVI	<i>NormalizedDifferenceVegetation Index</i>
OACI	Organização da Aviação Civil Internacional
PC	Pontos de Controle
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica Estabelecida
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Digitais
PIB	Produto Interno Bruto
PPK	<i>Post Processedkinemati</i>
RPA	Aeronave Remotamente Pilotada
VANT	Veículo Aéreos Não Tripulados
VLOS	<i>Visual Line-Of-Sight</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA.....	18
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo Geral	19
1.2.2	Objetivos específicos	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	MINERAÇÃO E MEIO AMBIENTE	20
2.2	LEGISLAÇÃO BRASILEIRA	20
2.3	TOPOGRAFIA CONVENCIONAL.....	22
2.4	<i>GLOBAL POSITIONING SYSTEM</i> (GPS)	23
2.5	VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANTs).....	24
2.6	ESTEREOSCOPIA	25
2.7	FOTOGRAMETRIA.....	26
2.8	AEROFOTOGRAMETRIA	27
2.9	PONTOS DE CONTROLE.....	29
2.10	PLANEJAMENTO DO LEVANTAMENTO AÉREO	30
2.11	PROCESSAMENTO DE DADOS	31
2.12	RESULTADOS DO PROCESSAMENTO	31
2.12.1	Nuvem Densa	31
2.12.2	Ortomosaico	32
2.12.3	Malha Triangular	32
2.12.4	Modelo Digital de Superfície (MDS)	32
2.12.5	Modelo Digital de Terreno (MDT)	32
2.13	CONTROLE DE QUALIDADE	32
2.14	APLICAÇÕES DOS VANTS	33
2.14.1	Aplicações na Agricultura	34
2.14.2	Aplicações na Infraestrutura	35
2.14.3	Aplicações na Mineração	36
3	METODOLOGIA	37
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA.....	38
3.2	DEFINIÇÃO DA AERONAVE UTILIZADA	39

3.3 DETERMINAÇÕES DOS PONTOS DE CONTROLE (PC).....	40
3.3.1 Materialização dos pontos de controle	40
3.3.2 Aquisição das coordenadas dos pontos de controle.....	44
3.4 PLANO DE VOO	45
3.5 GERAÇÕES DOS MODELOS DE TERRENO E DE SUPERFÍCIE	47
3.5.1 Softwares de Processamento de Imagens	48
3.5.2 Alinhamentos das Imagens	48
3.5.3 Utilizações dos Pontos de Controle na Correção das Imagens	49
3.5.4 Construção da Nuvem Densa.....	50
3.5.5 Construção do Modelo Geométrico (<i>mesh</i>)	51
3.5.6 Texturização do Modelo.....	52
3.5.7 Construção do Modelo Digital de Elevação.....	52
3.5.8 Orthomosaic	53
3.6 OBTENÇÃO DE DADOS A PARTIR DO MODELO GERADO	54
3.6.1 Obtenção de Coordenadas de Interesse.....	54
3.6.2 Influência dos Pontos de Controle nas Informações Geométricas do Modelo Digital	55
3.6.3 Curvas de Nível	56
3.6.4 Comparações do Volume obtido no Modelo com o Volume Real Produzido.....	57
3.6.5 Comparações entre a Metodologia Convencional de Levantamento Topográfico e a Topografia realizada por meio do Levantamento Aéreo com VANT	58
3.6.6 Análise Granulométrica com Imagens Aéreas	59
3.6.7 Verificação da Bancada de Desmonte	61
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1 DEFINIÇÃO DO VANT.....	63
4.2 Descrição dos pontos de controle obtidos	64
4.3 Análise dos pontos de controle	67
4.4 Avaliação da distribuição dos pontos de controle	68
4.4.1 Modelo 2017.....	68
4.4.2 Modelo 2018.....	69
4.4.3 Modelo 2019.....	70
4.5 Definição do Aplicativo	73
4.6 Comparação entre topografia convencional e a topografia COM VANT.....	73

4.7 Curvas de nível	74
4.8 Comparação dos valores do modelo corrigido com o não corrigido	76
4.9 Comparação Volumétrica.....	78
4.10 Resultado da análise da Fragmentação.....	79
4.11 Avaliação da Bancada de Desmonte	81
5CONCLUSÕES.....	84
REFERÊNCIAS.....	86

1 INTRODUÇÃO

A presente dissertação é um projeto que visa ilustrar a aplicação de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), conhecidos popularmente como *drone*, em um empreendimento mineiro de pequeno porte em Pernambuco. Hoje os resultados dessa tecnologia ainda sofrem resistência tanto por parte dos mineradores como também dos órgãos públicos de regulamentação e fiscalização. A inserção da utilização desse equipamento no setor mineral, além de otimizar procedimentos rotineiros, pode ser uma eficiente ferramenta para o gerenciamento e acompanhamento de uma mina.

Para isso, essa dissertação se estrutura em seis seções. A primeira seção apresenta uma introdução acerca do tema proposto, com uma visão geral da necessidade e importância da pesquisa, além de seus objetivos e justificativas; a segunda seção é constituída pelo referencial teórico, que apresenta um panorama da legislação nacional vigente acerca da utilização de VANTs, uma explanação da metodologia da fotogrametria em levantamentos aéreos e dos *softwares* especializados para planejar e processar as imagens; a seção três apresenta a caracterização da área levantada por plataforma aérea que servirá como base para o estudo; a seção quatro trata de explicar e detalhar, sistematicamente, a metodologia utilizada para o desenvolvimento desta dissertação, que consistiu basicamente em realizar levantamentos de dados de campo com a aeronave e o processamento dos dados em laboratório; a quinta seção expõe os resultados obtidos com a análise do erro e gama das informações obtidas discutindo os resultados em função de sua relevância; e a sexta e última seção apresenta as conclusões provenientes dos resultados obtidos.

A atividade de mineração é milenar e essencial para o desenvolvimento socioeconômico da sociedade moderna. É um setor da economia de extrema importância, que emprega milhões de pessoas ao redor do mundo e movimenta bilhões de dólares todos os anos. Atualmente, a indústria da mineração está inserida num mercado global e competitivo que força as empresas, não só de mineração, mas de todos os segmentos, a melhorar suas práticas, seja no âmbito social, ambiental ou econômico (AHMED, 2013).

A sociedade contemporânea tem se tornado gradativamente mais dependente dos recursos minerais, e sua dinâmica os exige para o seu funcionamento e desenvolvimento dos seus produtos. A maior parte dos objetos que cercam o homem necessita de alguma espécie de bem mineral como matéria-prima para sua produção; portanto, devido a este fato, a atividade de mineração tem sido alvo de estudo na busca do desenvolvimento e otimização das

operações intrínsecas de suas etapas de execução, desde a pesquisa mineral até o beneficiamento das substâncias extraídas (DE CARLI, 2013).

Os recursos minerais são explorados da natureza para fins de beneficiamento, transformação e utilização através de técnicas específicas denominadas métodos de lavra, o qual deve ser selecionado de modo que se consiga atingir uma maior produtividade ao menor custo unitário de produção. A lavra pode ser realizada basicamente por métodos a céu aberto e/ou subterrâneos. A extração mineral a céu aberto consiste em realizar uma escavação superficial para extração de minerais com valor econômico agregado, sendo geralmente aplicada a depósitos estratificados, horizontalizados e maciços e veios mergulhando em ângulos maiores do que o ângulo de repouso do material estéril e é caracterizada por ser uma atividade de alto custo de investimento, seja na fase inicial do projeto ou durante a operacionalização da metodologia de lavra, na qual o processo de tomada de decisão possui uma elevada complexidade devido às características estocásticas do sistema (AMARAL, 2008; BULLIVANT, 1987; HARTMAN E MUTMANSKY, 2002).

Neste contexto e por esse motivo, a constante busca pelo aumento da produtividade nas operações unitárias e redução de custos de produção propicia e estimula o desenvolvimento e aperfeiçoamento de ferramentas e métodos que auxiliem a tomada de decisão. Esses avanços tecnológicos têm o objetivo de impactar positivamente todo o setor mineral, que abrangem desde o planejamento das atividades, passa pela otimização das operações unitárias inerentes ao ciclo produtivo mineral e vai até o monitoramento do meio ambiente no que concerne à reabilitação da área degradada pela atividade de mineração (AMARAL E PINTO, 2010; ROCHA, 2017).

Esse processo de tomada de decisão pode ser facilitado com o auxílio de uma eficiente gestão de processos, a qual permite eliminar, otimizar e simplificar rotinas e atividades, proporcionando resultados econômicos e financeiros satisfatórios para o empreendimento que a adota como política. Esse gerenciamento envolve identificar, projetar, executar, documentar, medir, monitorar, controlar e melhorar as rotinas administrativas e operacionais do negócio para que seja possível alcançar os resultados pretendidos pela organização empresarial, além de permitir que se foque nos processos que são relevantes e que devem ser aprimorados bem como eliminar aqueles considerados desnecessários (SEBRAE, 2017).

Segundo Agra (2014), o sucesso ou fracasso de um empreendimento mineral está diretamente relacionado à gestão de cada projeto, e Sachs (2009) afirma que todas as etapas envolvidas na produção e gestão de negócios de uma mineradora podem ser modeladas e dimensionadas de forma mais eficiente quando há a possibilidade de visualização de todas as

informações do processo produtivo, desde a geologia até os estoques de produto final, passando pela definição da reserva mineral até a gestão de resultados. Essa capacidade de visualização do processo produtivo na gestão operacional na indústria de mineração pode ser facilitada através de aerolevantamentos realizados com VANTs.

Atualmente, a visualização do processo produtivo para gestão operacional na indústria de mineração através de aerolevantamentos realizados com VANTs, permite a extração de informação geográfica georreferenciada. Essas informações possibilitam ao engenheiro obter dados atualizados dos parâmetros do ciclo de produção, tais como o volume de uma pilha de minério, o volume de estéril do capeamento, volume das bancadas remanescentes na mina, condições dos acessos, distribuição granulométrica do material desmontado, entre outros. A facilidade trazida por essa inovação abrange não apenas as operações cotidianas, pois o mesmo pode ser utilizado como artifício para elaboração de documentos e cumprimento de exigências dos órgãos fiscalizadores (VASCONCELOS, 2018).

1.1 JUSTIFICATIVA

A utilização de aeronaves não tripuladas é uma metodologia inovadora no que diz respeito à obtenção de informações de caráter imediato, sem acarretar problemas na qualidade. Apesar dessa ferramenta já estar consolidada nas regiões sul e sudeste, no estado de Pernambuco ainda é vista com certa desconfiança tanto pelas empresas do setor como pelos órgãos públicos atuantes.

O VANT é uma ferramenta que pode impactar positivamente não só na lavra, mas também pode facilitar avaliações ambientais, quanto ao desmatamento e degradação causada pela exploração mineral. As inúmeras possibilidades de utilização promovida por esse equipamento são indispensáveis para implementar a modernidade no setor e trazer mais eficiência e precisão a novos projetos e reestruturação dos já existentes.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho foram divididos em objetivos gerais e objetivos específicos para melhor entendimento.

1.2.1 Objetivo Geral

O trabalho busca rever algumas das diversas utilizações de VANTs em empreendimentos mineiros para a obtenção de dados significativos para o empreendedor em um pequeno espaço de tempo e a baixo custo, avaliando sua aplicação como ferramenta de planejamento e controle em uma mineração.

1.2.2 Objetivos específicos

- Comparar a qualidade e vantagens do levantamento topográfico tradicional com uso de GPS geodésico com o levantamento com VANT em um empreendimento mineiro;
- Descrever como funciona a fotogrametria e como ela é aplicada por *softwares* na criação de modelos espaciais oriundos do levantamento aéreo;
- Avaliar aplicabilidade dos modelos digitais de superfície e de terreno gerados em uma mineração, como fonte de informações topográficas, geográficas e espaciais;
- Demonstrar a funcionalidade do VANT em procedimentos rotineiros na mineração, tais como análise granulométrica, determinação de volumes e desmonte de rochas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O trabalho buscou utilizar referências atualizadas e de fácil interpretação para facilitar a compreensão do assunto abordado.

2.1 MINERAÇÃO E MEIO AMBIENTE

A atividade mineral é milenar e é um dos principais responsáveis pelo intenso desenvolvimento econômico e social desde os tempos da revolução industrial, pois nesse período houve um aumento significativo da produção de bens minerais para suprir um mercado consumidor em expansão. Com o passar do tempo problemas começaram a surgir e cada vez mais eram exigidas das empresas soluções quanto à produtividade e qualidade dos produtos. Nesse momento da história não havia nenhum tipo de preocupação ambiental ou desenvolvimento sustentável, o que causou grande impacto ambiental. Hoje, no entanto, as empresas buscam como regra adotar práticas de responsabilidade social e ambiental, de modo a não prejudicar sua produção e atender as necessidades do mercado (EGGER, 2016).

Além de ser utilizado como um equipamento para o minerador obter informações da sua produção, a utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT's) como uma ferramenta de fiscalização e acompanhamento do desenvolvimento de empreendimentos mineiros. Essa facilidade em manter dados do empreendimento atualizados otimiza a elaboração e alimentação de documentos de cunho fiscal e vem ganhando espaço entre os órgãos responsáveis como uma forma de obter informações atuais da mina, tanto na extração mineral como também no avanço da supressão vegetal causada pela mineração (SCHWUCHOW, 2018). Assim garantir o acompanhamento atualizado de procedimentos que impactam o meio ambiente, tornando as medidas preventivas e corretivas mais eficientes.

2.2 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), em maio de 2017, criou um regulamento especial com regras gerais para o uso civil de aeronaves não tripuladas no Brasil, conhecidas pela população como drones. Além delas, antes de qualquer opção, também devem ser observadas as normas do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), do Ministério da Defesa e da Agência Nacional de Telecomunicação (Anatel). A norma editada que trata desse tema é o Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial – RBAC

nº 94 (ANAC, 2017).O equipamento pode ser definido como Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) ou Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), entretanto o termo padronizado pela Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) é RPA para aeronaves com propósito não recreativo (DECEA, 2018).

São definidas na legislação 3 (três) situações de voo: a primeira é a BVLOS, operação na qual o piloto não consegue manter a RPA dentro de seu alcance visual, mesmo com o auxílio de um observador (pessoa que tem como função ajudar o piloto na condução segura, sempre mantendo contato com a aeronave); a segunda é a VLOS, operação em que o piloto mantém contato direto com a aeronave, mesmo sem um observador, e por fim a operação EVLOS, situação na qual o piloto ou observador apenas conseguem manter contato visual com a aeronave por meio de equipamentos de observação, tal como um binóculo. A figura 1 ilustra essas situações.



Fonte: ANAC (2017).

As RPAs são divididas em 3 classes, definidas em função do peso máximo de decolagem, no qual são considerados os pesos do equipamento, da bateria ou combustível da carga eventualmente transportada. Na Tabela 1 está a descrição dessas classificações.

Tabela 1 – Classificação das aeronaves segundo a legislação brasileira.

Classes	Peso Máximo de Decolagem	Exigências da aeronavegabilidade
Classe 1	Acima de 150 kg	Certificação similar a aeronaves tripuladas. Essas aeronaves devem ser registradas no Registro Aeronáutico Brasileiro e identificados com suas marcas de nacionalidade e matrícula.
Classe 2	Acima de 25 kg e menor ou igual a 150 kg	O projeto do equipamento deve atender requisitos técnicos específicos. Além disso devem ser registrados no Registro Aeronáutico Brasileiro e identificados com suas marcas de nacionalidade e matrícula.
Classe 3	Abaixo ou igual a 25 kg	As RPA dessa classe que operem além da linha visual (BVLOS) ou acima de 400 pés (120m) deverão ser de um projeto autorizado pela ANAC e precisam ser registradas no Registro Aeronáutico Brasileiro e identificados com suas marcas de nacionalidade e matrícula. Aeronaves que operem até 400 ft e de forma VLOS, não precisam ser de projeto autorizado, mas devem ser cadastradas na ANAC por meio do sistema SISANT. Aeronaves com até 250g não precisam de cadastro ou registro, independente da finalidade.

Fonte: ANAC (2017).

2.3 TOPOGRAFIA CONVENCIONAL

Determinar um ponto é atribuir a ele coordenadas geográficas espaciais. Embora atualmente esta seja uma tarefa bastante simples, utilizando satélites artificiais apropriados para esse fim, determinar a posição foi um dos primeiros problemas científicos que o ser humano procurou solucionar (Monico, 2018). Além da necessidade de posicionamento e orientação, também surgiu a necessidade de registrar itinerários e determinar pontos de referência, realizando a atividade de mapeamento, definida como sendo um conjunto de operações de levantamento, construção e reprodução das cartas (representação em escala da superfície) de uma determinada região. Nas cartas topográficas devem constar contorno, relevo, os acidentes naturais e artificiais, sendo estas divididas em cartas planimétricas, altimétricas ou planialtimétricas (FONTES, 2005).

Ao projetar qualquer obra de Engenharia, Arquitetura ou Agronomia, geralmente é realizado o prévio levantamento topográfico do lugar onde a mesma deverá ser implantada. A topografia, que se incumba do levantamento ou medição, deverá ser precisa e adaptada ao terreno. A topografia tem por finalidade determinar o contorno, dimensão e posição relativa de uma porção limitada da superfície terrestre, sem levar em conta a curvatura resultante da esfericidade terrestre (ESPARTEL, 1965).

O levantamento topográfico tradicional consiste no uso de instrumentos de medidas planialtimétricas para a determinação das coordenadas de pontos definidos no espaço. Por volta do século XX, as coordenadas dos pontos ainda eram obtidas através de teodolitos (figura 2a) para medidas angulares (horizontais e verticais) e trenas para medidas lineares. Esses dados eram trabalhados em tabelas trigonométricas para a determinação do posicionamento relativo (PERONI, 2017).

Em seguida, foram desenvolvidos novos equipamentos que incorporavam as leituras dos ângulos e distâncias chamados de estações totais (figura 2b). Assim como o equipamento anterior (teodolito), as estações totais também usavam feixes de ondas eletromagnéticas emitidas da base ao refletor e novamente recebida na base (PERONI, 2017). Apesar de essa tecnologia ter acelerado o levantamento topográfico, ainda requer bastante tempo para ser executada, especialmente em áreas de grandes dimensões.

Figura 2–Teodolito modelo Xpex DE-2A (a) e a estação total modelo Topcon GTS-102N (b).



Fonte: Embratop(2019).

2.4 GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS)

O Navstar-GPS, ou apenas GPS (*Global Positioning System*), como é conhecido, é um sistema de radionavegação, que utiliza uma constelação de satélites, desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América, visando ser o principal sistema de navegação das Forças Armadas norte-americanas. A concepção do sistema de GPS permite que o usuário, em qualquer lugar da superfície da terra, ou próximo a esta, tenha a sua disposição no mínimo quatro satélites para serem rastreados, permitindo que se realize o posicionamento em tempo real. Ele, juntamente com o GLONASS (Rússia), GALILEO (União Europeia) e o COMPASS (China), formam o GNSS (*Global Navigation Satellite System*). O sistema GNSS está ilustrado na figura 3 (MONICO, 2008).

Figura 3 – Sistema GNSS.



Fonte: IG (2016).

Os métodos espaciais de geolocalização têm conquistado um papel muito significativo nos métodos de posicionamento utilizados em geodésia e mais recentemente estão se

destacando ao serem usados para fins topográficos. A propagação da tecnologia e a gradual redução dos preços, acompanhado pelo aumento da mobilidade e capacidade dos receptores disponíveis no mercado, tem possibilitado a popularização do uso do posicionamento geodésico, principalmente para levantamentos topográficos (CASACA, 2007).

2.5 VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANTS)

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTS) são aeronaves de voo autônomo ou remotamente controlado e se caracterizam por não possuir piloto embarcado. Inicialmente essa tecnologia foi utilizada como arma bélica pelas forças armadas de diversos países, mas atualmente esse equipamento já se encontra acessível para atender a demanda civil e vem ganhando espaço no mercado devido à sua diversidade de aplicações entre as quais pode-se destacar a agricultura e o meio ambiente (GOMES,2014).

Os VANTS podem ser divididos basicamente em duas categorias: os multirotores e os de asa fixa. A aeronave multirotor é o tipo mais popular e possui uma faixa de preço mais acessível (PENNA NETO, 2017). Ela possui 4 rotores e 2 pares de hélice dispostas em diagonal e é capaz de decolar e pousar na vertical, o que facilita seu uso em terrenos acidentados, entretanto possui pequena autonomia voo, cerca de 22 minutos, problema que se intensifica em condições de vento forte (VASCONCELOS, 2018).

As aeronaves de asa fixa possuem essa denominação, pois, similar a um avião, sua sustentação principal é gerada pelo uso de asas fixas, permitindo maior tempo de permanência do equipamento no ar. São utilizadas principalmente para mapeamentos de grandes áreas e, uma vez que atinge a velocidade e a altitude prevista para execução do levantamento, o consumo de energia é reduzido consideravelmente. Apesar de possuir maior autonomia de voo, ela necessita de maiores cuidados para seu uso em campo, principalmente na decolagem e pouso (VASCONCELOS, 2018). A figura 4 ilustra os dois tipos de aeronave.

Figura 4 – Veículos aéreos não tripulados: multirotor (a) e asa fixa (b).

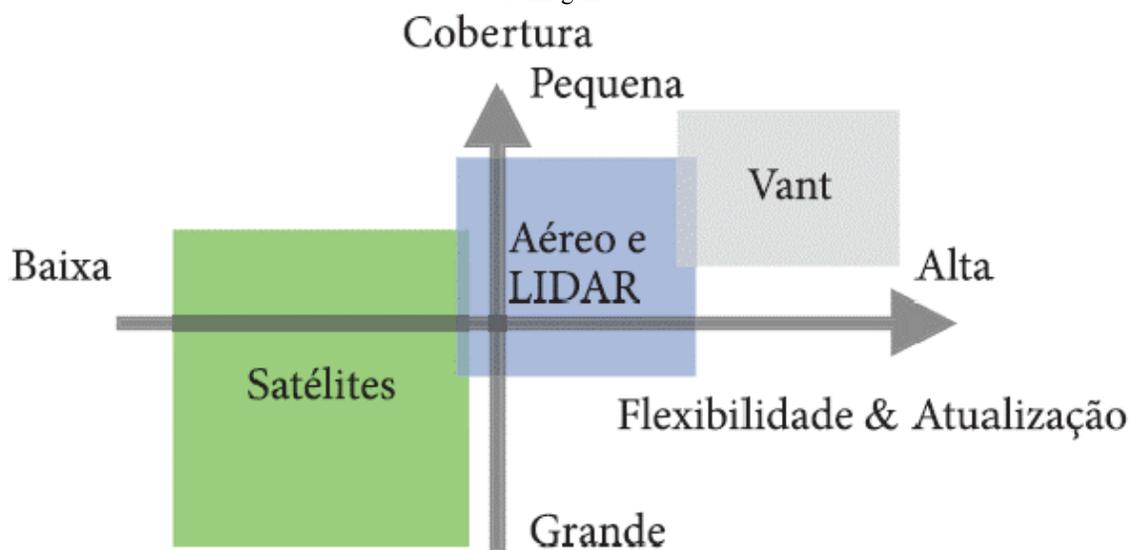


Fonte: Sensix (2019).

As principais vantagens dos VANTs estão associadas à versatilidade e flexibilidade em comparação com satélites e aeronaves tripuladas, como pode ser observado na figura 5 (JORGE, 2014). Embora o uso de imagens de satélites e de aeronaves tripuladas de maior porte cobram uma área maior, os VANTs se sobressaem na frequência de atualização e facilidade operacional.

A figura 5 ilustra as metodologias disponíveis atualmente para obtenção de imagens a serem utilizadas na fotogrametria, sendo possível comparar de maneira sucinta as principais características de cada possibilidade.

Figura 5—Comparação da área de cobertura e frequência de atualização dos dados entre os métodos de obtenção de imagens.



Fonte: Jorge (2014).

2.6 ESTEREOSCOPIA

A estereoscopia é uma técnica que permite a visão em perspectiva, possibilitando a obtenção de informações do espaço tridimensional, considerando a posição e a situação de objetos através da análise de imagens obtidas de dois pontos distintos (LINDER, 2009). É um fenômeno natural que ocorre em muitos animais que possuem dois pontos de visão e, portanto, também no ser humano. As pessoas com visão normal, ou seja, capazes de enxergar com os dois olhos é denominada binocular, o que permite a visão estereoscópica e uma noção de profundidade espacial (PERONI, 2017).

A estereoscopia está fortemente ligada ao campo da fotogrametria e foto-interpretação, definida como sendo a ciência e a arte que permite a visão estereoscópica e o estudo desse

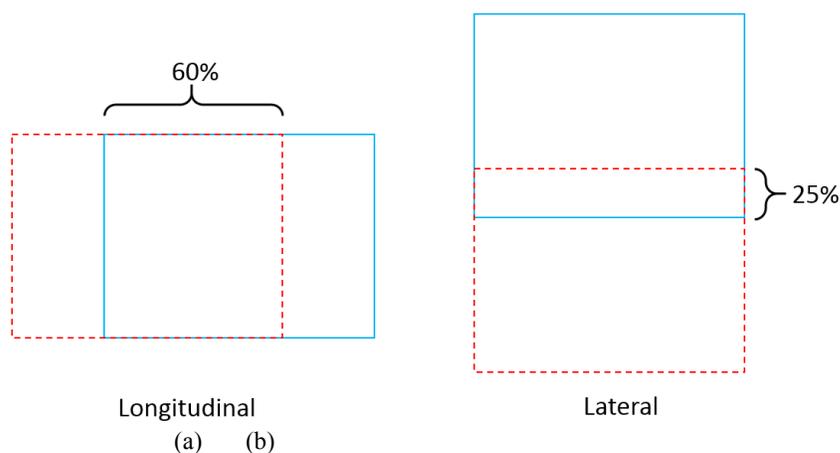
efeito. O conceito básico de funcionamento da maior parte dos aparelhos estereoscópicos diz respeito ao fornecimento de imagens iguais vistas de pontos diferentes, simulando o olhar humano, sendo uma imagem correspondente à visão do olho esquerdo e a outra do direito.

Além dos efeitos de estereoscopia, é fundamental que durante o processamento das imagens sejam detectados pontos nas fotos originais que sejam estáveis a partir dos diferentes pontos de tomada das fotos e também no aspecto de variações de iluminação em torno dos pontos de vizinhança. Esses pontos presentes nas duas imagens são necessários para correção e amarração das imagens obtidas pela câmera (PERONI, 2017).

2.7 FOTOGRAMETRIA

A fotogrametria é a ciência e tecnologia de obter informações confiáveis através de processos de registro, interpretação e mensuração de imagens. Tem seu maior campo de aplicação na confecção de mapas, colaborando com outras ciências como a Geodésia e a Cartografia (ANDRADE, 2003). A fotogrametria permite obter informações que possibilitem a tomada de medidas dignas de confiança por meio de fotografias, podendo ser estas aéreas, terrestres ou orbitais (MACHADO, 2016 *apud* MARCHETTI E GARCIA, 1977). Embora a fotogrametria não seja uma técnica recente, o uso de câmeras portáteis passíveis de serem transportadas em pequenas aeronaves é uma inovação significativa (PERONI, 2017). Na figura 6 é apresentada a sobreposição longitudinal (a) e lateral (b) da fotogrametria.

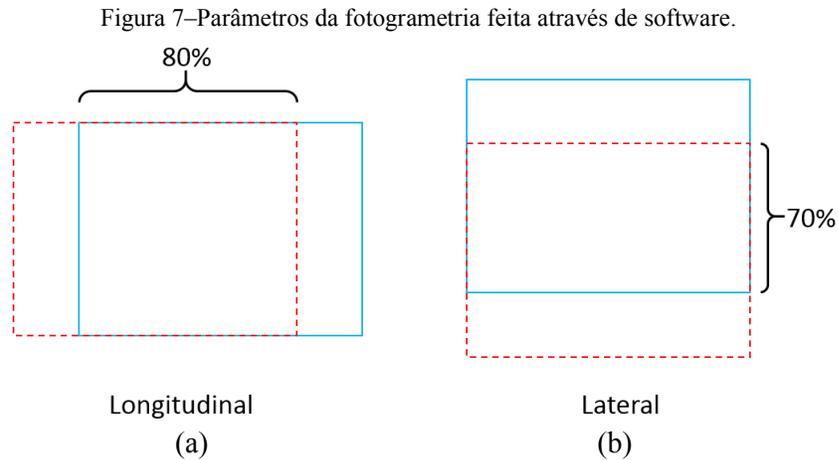
Figura 6—Parâmetros para fotogrametria convencional.



Fonte: Andrade (2003).

Nos *softwares* de planejamento de voo em VANT's, apesar de fundamentalmente ser através da fotogrametria, são utilizados algoritmos específicos para agrupar e conectar as

imagens aéreas. Para executar essa tarefa é necessária uma sobreposição lateral e longitudinal mínima mais elevada para garantir um resultado de qualidade, como é ilustrado na figura 7.

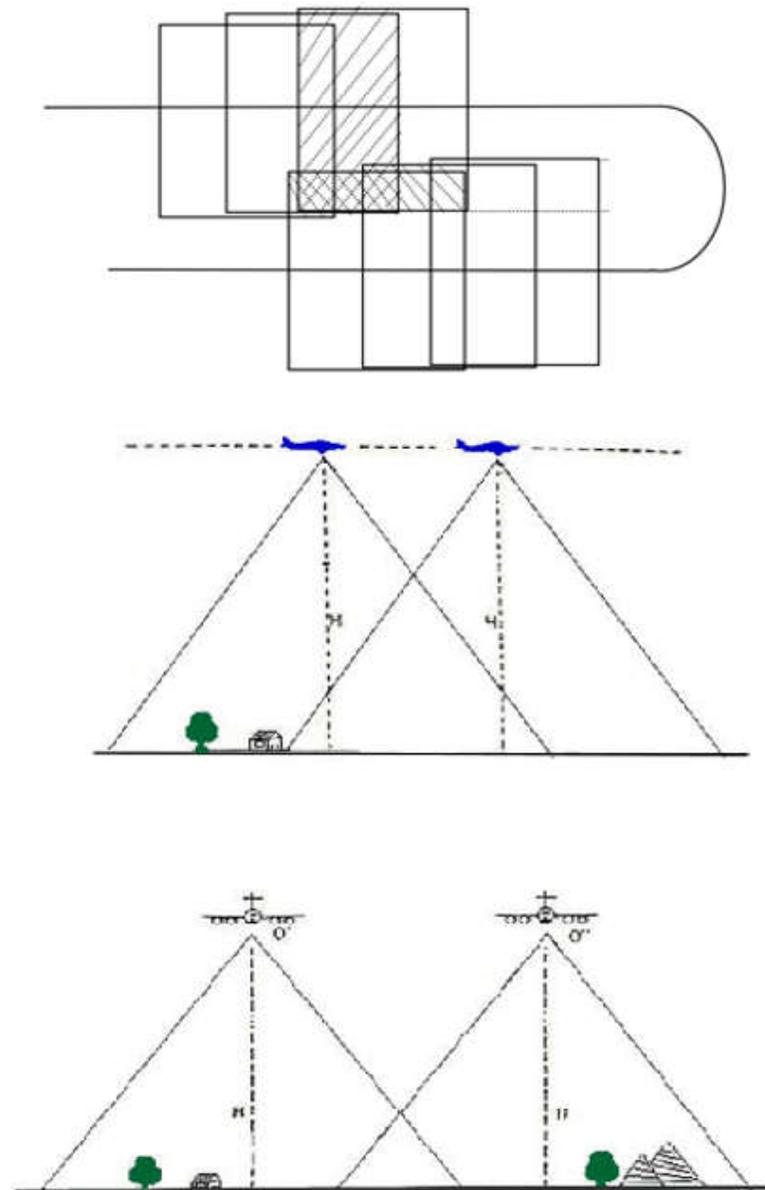


Fonte: Adaptado de Pix4D (2017).

2.8AEROFOTOGRAMETRIA

A parte da fotogrametria que trabalha com imagens aéreas é a aerofotogrametria, que utiliza técnicas que permitem a extração de informações métricas por meio de análise de imagens obtidas de plataformas aéreas, sejam estas tripuladas, como ocorre na fotogrametria convencional, ou remotamente pilotada, como é o caso dos VANTs (MACHADO, 2016 *apud* MARCHETTI E GARCIA, 1977). A figura 8 ilustra como funciona o deslocamento da aeronave durante a execução do plano de voo programado e a sistemática da coleta de imagens.

Figura 8– Metodologia de obtenção de imagens.



Fonte: Tommaselli (2009) e Geodem-UFF (2018).

A aerofotogrametria já é uma técnica cartográfica utilizada há mais de 100 anos e até hoje auxilia na obtenção e geração de materiais cartográficos. Inicialmente as imagens eram capturadas por meio de balões, logo em seguida por aviões e helicópteros, mas atualmente o mercado oferece a possibilidade dos levantamentos serem realizados por aeronaves tripuladas, satélites e aeronaves remotamente controlados (HORUS, 2018). A figura 9 demonstra como funciona o agrupamento das imagens aéreas empiricamente e ilustra o processo pelo qual as imagens passam para obtenção de um modelo digital.

Figura 9 –Imagens sobrepostas.



Fonte: Autor (2019).

Geralmente a aerofotogrametria empregando VANTs é requisitada em projetos de engenharia quando são necessárias informações atualizadas da superfície do terreno, em alta resolução. A capacidade das VANTs de conseguir levantar grandes áreas, mesmo as de difícil acesso, em um pequeno espaço de tempo, torna esse método ideal para a coleta de dados rotineiros. Entre os usos dessa forma de levantamento pode-se destacar o monitoramento de impactos ambientais, a agricultura de precisão e o mapeamento de minas a céu aberto(EISENBEISS, 2011).

Na mineração, essa tecnologia permite o mapeamento de estoques, de alvos de exploração, o gerenciamento e inspeção de áreas e estruturas, quantificação e qualificação de estoques e pilhas de material, com execução em curtíssimo tempo, e resultados praticamente instantâneos. A acurácia dos levantamentos aéreos, quando apoiados com pontos de coordenadas conhecidas em solo (pontos de controle), permite a substituição dos métodos tradicionais de topografia sem prejudicar a qualidade do resultado, além de reduzir a necessidade de pessoas transitando na mina (HORUS,2017).

2.9PONTOS DE CONTROLE

Os pontos de controle (PC) ou *GroundControl Points* (GCP) são pontos com coordenadas conhecidas (latitude, longitude e elevação) obtidas por meio de receptor geodésico de alta precisão. Eles são usados como pontos de amarração que auxiliam no processo fotogramétrico para posteriormente corrigir o modelo digital gerado (SILVA NETO, 2009).

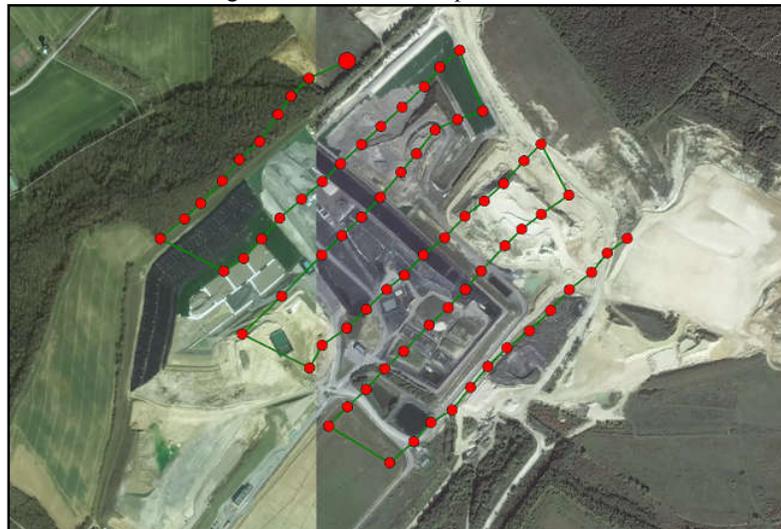
Os Alvos ou PC são indicados principalmente quando a área a ser coberta não apresenta feições de fácil fotoidentificação. Eles podem ser pintados em campo,

confeccionados artificialmente (removíveis) ou serem objetos fixos já presentes no local. Os alvos removíveis são tipicamente construídos em plástico ou papelão com cores que contrastam com o terreno. Esse tipo de marcação temporária é normalmente utilizado em áreas remotas, onde não são encontrados pontos bem definidos, o que dificulta sua visualização pela aeronave. É importante garantir que os alvos utilizados no levantamento aéreo não desapareçam com o tempo ou que sejam perturbados até a aquisição de todos os dados necessários para o projeto (US ARMY, 2002).

2.10 PLANEJAMENTO DO LEVANTAMENTO AÉREO

Além dos equipamentos, como o VANT e o GPS de precisão, são necessários *softwares* específicos para o planejamento da missão, controle durante o voo e para o processamento fotogramétrico. As metodologias utilizadas nos *softwares* de planejamento de voos fotogramétricos são similares aos da fotogrametria convencional apesar de utilizarem geralmente uma sobreposição maior. Os *softwares* específicos para essa finalidade usam a base de dados do Google como referência para os planos de voo, que são inseridos no mapa. Os *softwares* também gerenciam a quantidade de bateria, velocidade e funcionamento da câmera, além de permitir o acompanhamento em tempo real da trajetória programada, possibilitando ao usuário uma intervenção instantânea durante a execução do plano de voo (SILVA et al., 2014). Na figura 10 é apresentada uma estrutura de um plano de voo elaborado em um desses *softwares*.

Figura 10 – Estrutura de plano de voo.



Fonte: Beltrão (2017).

2.11 PROCESSAMENTO DE DADOS

O processamento das imagens capturadas é realizado através de *softwares* computacionais, baseados na metodologia fotogramétrica, que utilizam algoritmos específicos para promover a foto-identificação das imagens. A característica comum entre eles é que necessitam de entrada apenas dos dados de calibração da câmera, do arquivo de log (coordenadas do centro de cada imagem e inclinações, ω , ϕ , κ , ou *Yaw*, *Pitch*, *Roll*) e das imagens. Caso a câmera não tenha sido calibrada previamente também é possível efetuar a calibração com certa seleção das imagens do próprio voo (SILVA et al., 2014).

Todo o processamento, desde a orientação interna, correspondências automáticas entre todas as imagens, ajustamento simultâneo de feixes em bloco, e geração dos produtos, como Modelo Digital de Superfície (MDS), Modelo Digital de Terreno (MDT) e ortomosaicos, são realizados automaticamente, apesar dos parâmetros configurados em cada etapa serem de suma importância para obtenção de um resultado com qualidade. O processamento fotogramétrico automático pode ser concluído apenas com as posições dadas pelo GPS embutido na aeronave, mas para se obter uma melhor precisão é conveniente o uso de pontos de apoio e pontos de checagem para o controle de qualidade (SILVA et al., 2014). Entre os *softwares* mais conhecidos e que apresentam bons resultados pode-se destacar o *AgisoftPhotoscan* e *Pix4Dmapper*.

2.12 RESULTADOS DO PROCESSAMENTO

Entre os produtos gerados a partir das imagens coletadas no levantamento aerofotográfico pode-se destacar os seguintes: nuvem de pontos por estereoscopia, ortomosaicos, Modelo Digital de Superfície (MDS) e Modelo Digital de Terreno (MDT).

2.12.1 Nuvem Densa

É o resultado da interpolação de um conjunto de pontos alinhados a partir de pontos homólogos entre pares de fotos, como também pelas informações geográficas do momento da captura da imagem e/ou marcadores com coordenadas conhecidas na área de estudo. Elas podem ser construídas de forma densa, que aumenta o detalhamento, mas torna o processo mais demorado, e a esparsa, que usa um maior intervalo entre os pontos (PERONI, 2017).

2.12.2 Ortomosaico

Representa a integração do conjunto de fotografias em apenas uma imagem, similar a um mapa devido à sua qualidade em termos de precisão e por apresentar poucas distorções, sendo tipicamente utilizada para obtenção de medidas espaciais no projeto.

2.12.3 Malha Triangular

É uma malha poligonal gerada a partir das informações da nuvem densa, ou seja, seu resultado está diretamente ligado à etapa de construção de nuvem densa. Essa etapa possibilita a quantificação de dados no modelo e filtrar as informações de interesse. Após a classificação da nuvem densa é possível criar uma malha triangular apenas utilizando os dados da nuvem densa de sua escolha, servindo como base para a construção do MDT.

2.12.4 Modelo Digital de Superfície (MDS)

O MDS consiste na criação de um modelo que leva todas as características da superfície em consideração, tais como: vegetação, construções e objetos. De modo geral é um produto irrelevante para obtenção de curvas de nível, pois seus resultados vão estar mascarados pela presença de ruídos (objetos que não tem relação direta com a superfície topográfica do terreno).

2.12.5 Modelo Digital de Terreno (MDT)

O MDT é um dos principais produtos da fotogrametria para o uso na mineração. Nesse modelo, a nuvem densa passa por um processo de filtragem, onde são removidos qualquer tipo de ruído do projeto, permitindo uma representação fiel do terreno estudado, o que possibilita a obtenção de informações significativas quanto à topografia do local levantado.

2.13 CONTROLE DE QUALIDADE

A confiabilidade da utilização de produtos cartográficos e sua classificação quanto ao nível de distorções encontrados no projeto é fundamental para definir o limite de seu uso como fonte de dados (ZANARDI, 2016). O decreto de Lei nº 89.817 de 20 de junho de 1984

estabelece que 90% dos pontos definidos, quando testados no terreno, não deveriam ultrapassar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica Estabelecida (PEC) pelo órgão competente (BRASIL, 1984). Segundo esse decreto o indicador estatístico de dispersão relativo a 90% de probabilidade corresponde a 1,6449 vezes o valor do erro padrão (EP) encontrado, assim o $PEC = 1,6449 * EP$. Com o avanço dos métodos de produção cartográficos foi definido uma nova PEC para classificar os resultados quanto a sua qualidade especificamente para modelos digitais o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Digitais (PEC-PCD). Os produtos são classificados em classe A, B, C e D, na qual a classe A é a de maior qualidade e a classe D a de pior qualidade. Esse padrão estabelecido é apresentado na tabela 2 para a planimetria e a tabela 3 para a altimetria.

Tabela 2 – Padrão de Exatidão Cartográfica (planimetria).

PEC	PEC-PCD	1:1000		1:2000		1:5000	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
-	A	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85
A	B	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50
B	C	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50
C	D	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00

Fonte: ET-ADGV-Defesa F Ter 1ª Parte 2ª Edição 2016 (Versão 1.1 – março 2016).

Tabela 3 – Padrão de Exatidão Cartográfica (altimetria).

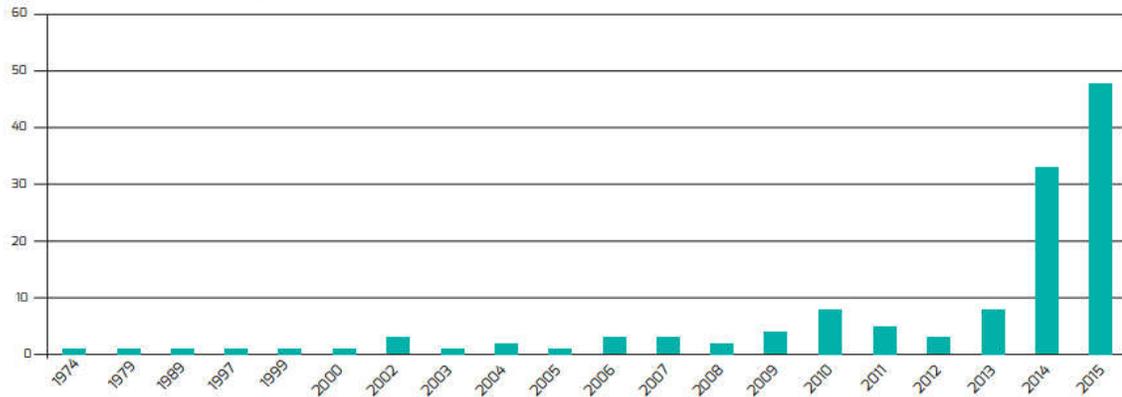
PEC-PCD	1:1000		1:2000		1:5000	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34
A	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66
B	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80
C	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00

Fonte: ET-ADGV-Defesa F Ter 1ª Parte 2ª Edição 2016 (Versão 1.1 – março 2016).

2.14 APLICAÇÕES DOS VANTS

O uso de VANTS como uma ferramenta do cotidiano de diversas empresas vem se disseminando, se tornando cada vez mais aceita por diversos setores, como a construção civil, a mineração e a agricultura. Na figura 11 é ilustrado o crescimento do uso dessa tecnologia no Brasil, na qual é possível observar uma tendência de aberturas de empresas especializadas nessa inovação.

Figura 11 – Empresas abertas especializadas em VANTs no Brasil.



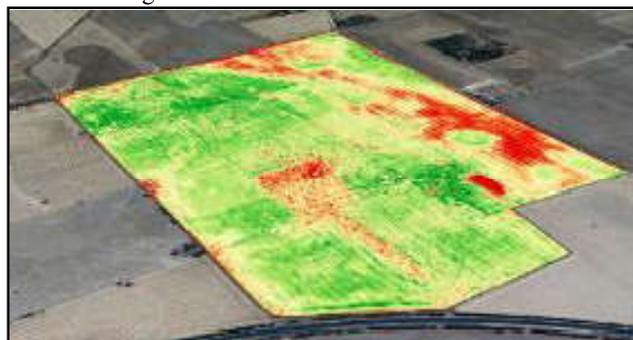
Fonte: MDIC (2018).

2.14.1 Aplicações na Agricultura

A agricultura é um dos principais negócios nacionais com grande participação no Produto Interno Bruto (PIB) e significativo impacto em índices socioeconômicos. Por isso, a possibilidade de aplicar os conceitos da agricultura de precisão e otimizar a produção é bem recebida pelos produtores. Com as técnicas modernas de sensoriamento remoto através de VANTs, esse método se tornou uma ferramenta fundamental na análise de agricultura de precisão fornecendo ao agricultor o máximo de informações possíveis. Segundo Padolfi, Ramaldes e Santos (2018) é possível identificar e classificar, com a utilização de processamento de imagens aéreas e algoritmos específicos, características e anomalias nas culturas plantadas.

Para realizar essa tarefa é utilizada uma aeronave que deve estar munida de sensores baseados na espectroscopia de refletância, ou seja, medidas de reflexão da radiação eletromagnética. A metodologia utiliza o índice *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) para localizar e diferenciar plantas saudáveis das não saudáveis (figura 12).

Figura 12 – Análise de lavoura de milho.



Fonte: Rastros (2019).

Na imagem a coloração verde indica uma plantação saudável, enquanto as manchas vermelhas expõem zonas na qual ocorreram anomalias, como pragas ou irrigação insuficiente. Através desse levantamento é possível monitorar toda a plantação e atuar de maneira corretiva e preventiva nos pontos destacados.

2.14.2 Aplicações na Infraestrutura

Segundo o Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (2018), os drones não apenas são capazes de executar trabalhos ariscados, mas também possibilitam a obtenção de diversos conjuntos de dados, e o fazem com precisão e baixo custo. Empresas que operam em redes extensas de ativos, tais como energia, estradas, ferrovias ou petróleo e gás podem se beneficiar diretamente dessa nova tecnologia.

Entre as aplicações dos VANTs na infraestrutura pode-se destacar o monitoramento de investimentos e acompanhamento em tempo real de processos de construção e manutenção. Esses levantamentos, quando realizados pelos métodos tradicionais, são demorados e dispendiosos, apesar de em alguns casos ser obrigatório a visita por pessoa certificada.

O mapeamento com VANTs na engenharia rodoviária para a obtenção de Modelos Digitais de Terreno são promissores para cálculos de volume de terraplanagem e projetos geométricos, principalmente pelos seus custos mais favoráveis relacionados a equipamentos e pessoal. Entretanto, é necessário sempre estabelecer padrões de operação para obtenção de resultados satisfatórios (ALMEIDA, 2016). A figura 13 ilustra a capacidade do VANT em verificar a situação de uma obra em tempo real.

Figura 13 – Imagem aérea de obra civil.



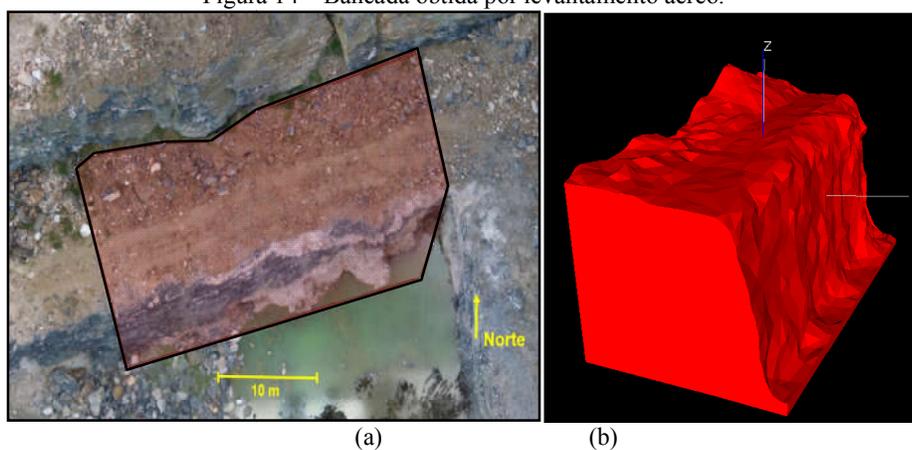
Fonte: Horus (2017).

2.14.3 Aplicações na Mineração

Segundo Peroni (2016), os levantamentos aéreos com VANTs são capazes de fornecer informações de qualidade, em uma mineração, através de uma correta e bem planejada coleta de imagens da plataforma aérea, tudo isso executado em um pequeno espaço de tempo e poucos custos envolvidos. Entre os dados obtidos pode-se destacar volumes, geometria e posição georreferenciada.

A mineração é um dos mercados mais competitivos e o uso de novas tecnologias como os VANTs vem ganhando espaço, por ser um equipamento de baixo custo e fornecer resultados que possibilitam otimizar algumas operações da mineração, tais como, gerenciamento e monitoramento de atividades corriqueiras (VASCONCELOS, 2018). Na figura 14 é possível observar uma bancada, em 2D e 3D respectivamente, de uma cava para produção de brita, na qual a obtenção de dados como volume, altura e geometria são facilmente obtidos.

Figura 14 – Bancada obtida por levantamento aéreo.



Fonte: Vasconcelos(2018).

Na figura 14(a) é ilustrada a bancada em 2D em escala, observada no *Agisoftphotoscan* e na figura 14(b) é ilustrada a mesma bancada em 3D modelada no *softwareStudio 3*, da Datamine, na qual é possível observar a bancada de outras perspectivas.

3 METODOLOGIA

Para consecução dos objetivos definidos para elaboração da presente dissertação foram construídos diversos modelos de cava obtidos a partir de levantamentos aéreos com VANTs, realizada a comparação e análise dos modelos digitais gerados e desenvolvidas as metodologias para aplicação em planejamento de lavra e gestão operacional. Esses levantamentos práticos foram realizados principalmente na Pedreira Esperança, que é uma mineração de agregados localizada na Região Metropolitana do Recife. Os estudos ocorreram no período de cerca de 2 (dois) anos, compreendidos entre dezembro de 2017 e janeiro de 2019. Durante as visitas técnicas à área de estudo foram realizados diversos levantamentos aéreos com parâmetros distintos, escolhidos de acordo com o objetivo ao que se destinariam os dados coletados, conforme descrito a seguir:

Inicialmente foi realizado um trabalho de avaliação dos VANTs presentes no mercado para seleção do equipamento que melhor se enquadrasse nas necessidades e no orçamento do projeto. Após avaliação dos modelos disponíveis foi adquirido um VANT quadricóptero modelo *Phanton 4 Advanced* no terceiro trimestre de 2017. Durante o restante do segundo semestre de 2017 o equipamento foi testado; o operador foi treinado através de cursos na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), promovidos pelo Departamento de Cartografia e de Geografia, e por fim foram selecionados os *softwares* de planejamento de voo e de modelagem fotogramétrica;

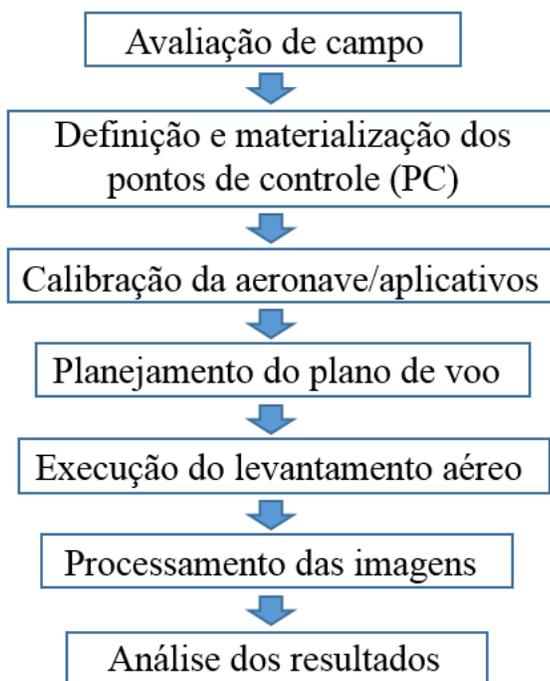
No final de dezembro de 2017 foram iniciados os levantamentos aéreos para fins de determinação dos parâmetros geométricos da cava da Pedreira Esperança. Nesses levantamentos já foram utilizados pontos de controle em solo, para aumentar a precisão do georreferenciamento;

Durante o ano de 2018 foram realizados diversos levantamentos aéreos, para estudar as possibilidades do uso desse método em procedimentos comuns no setor mineral, tais como: desmonte, análise granulométrica dos resultados do desmonte com explosivos e determinação de área total de lavra, determinação de volume de materiais em bancadas e planejamento do avanço da cava;

Durante o período dos levantamentos aéreos foi realizado simultaneamente o processamento das informações obtidas em campo, gerando Modelos Digitais de Superfície (MDS), Modelos Digitais de Terreno (MDT), modelo da bancada de desmonte e identificação do sistema de fraturamento do maciço rochoso na face e piso das bancadas através de técnicas de *scanline* e *scanface*;

Após a fase de levantamento de campo, com todos os dados reunidos e compilados, foi desenvolvida uma análise dos resultados obtidos, comparando os modelos gerados e extraindo o máximo de informações dos produtos finais. Este estudo foi conduzido no Laboratório de Planejamento de Lavra do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco (LAPLA/CTG/UFPE). A figura 15 ilustra o fluxo metodológico utilizado para obtenção dos resultados, mostrando de maneira sucinta todas as etapas do processo.

Figura 15 – Fluxo de trabalho programado.



Fonte: O autor (2019).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

Foram executados diversos levantamentos aéreos para fins fotogramétricos com o uso do VANT *Phantom 4 Advanced*. As áreas foram escolhidas de modo a observar a aplicação da metodologia em diferentes situações, além da necessidade de conciliação com projetos internos do laboratório do Laboratório de Planejamento de Lavra da UFPE e interesses de empresas parceiras.

A Pedreira Esperança é um empreendimento mineiro de pequeno porte de acordo com a renda anual bruta que gira em torno de R\$ 4.800.000,00 e quantidade de funcionários inferior a 100. Foi fundada em 13 de setembro de 2012, ela comercializa granito britado em diferentes granulometrias (brita 5-0 e pó de brita), cujo principal comprador é o setor da

construção civil da Região Metropolitana do Recife. Ela está localizada no município de Vitória de Santo Antão/PE, no Engenho Itamatamirim, às margens da BR-232. A figura 16 apresenta a localização dessa empresa. A empresa conta com 28 funcionários e possui uma produção mensal de 12.000 m³ empolados de brita

Figura 16– Localização de Pedreira Esperança.



Fonte: O autor (2019).

3.2 DEFINIÇÃO DA AERONAVE UTILIZADA

Inicialmente foi feita uma avaliação das características necessárias que o VANT deveria possuir para a realização do trabalho previsto. As principais especificações utilizadas para filtrar o tipo e modelo da aeronave foram tempo de autonomia de voo, versatilidade do equipamento, qualidade/resolução das imagens capturadas e custo de aquisição. Diante dos parâmetros estabelecidos foi realizada uma pesquisa de tipos, modelos e preços de VANTs presentes no mercado. A tabela 4 ilustra essa comparação, o multirrotor considerado foi da série Phantom enquanto que a asa fixa foi da Raptor. O modelo “matrice” da DJI foi desconsiderado devido ao alto custo e não apresentar vantagens significativas para o projeto.

Tabela 4 – Comparação entre os modelos da aeronave.

Aeronave	Multirrotor	Asa fixa
Valor (R\$)	7.000,00	68.000,00
Autonomia de voo (min)	22	120
Decolagem	Vertical	Horizontal
Cobertura aérea	Menor	Maior
Versatilidade	Maior	Menor

Fonte: Santiago & Cintra (2019).

3.3 DETERMINAÇÕES DOS PONTOS DE CONTROLE (PC)

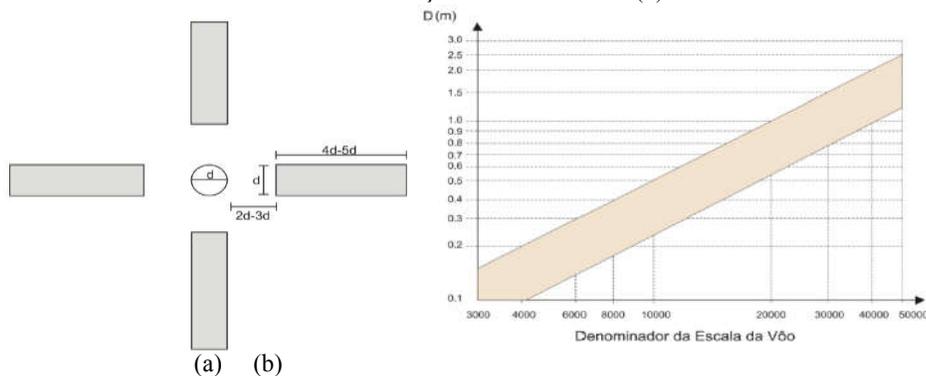
A localização dos pontos de controle é planejada em função do plano de voo da área a ser levantada. Sempre buscando a concordância entre os requisitos de distribuição geral e localização estratégica dos pontos de controle, esses devem permanecer em terreno plano, com boa visibilidade para cima e longe de objetos que possam obstruir sua identificação da imagem aérea, tais como, edifícios, árvores e aterros.

Para a locação dos pontos de controle, foi realizado inicialmente o reconhecimento geral da área da cava da Pedreira Esperança através do qual puderam ser estabelecidos fatores para a escolha da posição de cada um. Para determinar esses pontos de controle, foram levadas em consideração as diferentes altitudes presentes na cava, distribuição homogênea dos pontos e plano de voo que será executado, para garantir que os pontos sejam facilmente observados nas imagens aéreas.

3.3.1 Materialização dos pontos de controle

Os PC's foram materializados em campo através da utilização de um alvo em formato de "X" e a metodologia utilizada para determinar a dimensão desses alvos foi baseado no manual das forças armadas americanas o *Photogrammetric Mapping – Engineer Manuale* também do GSD (*GroundsampleDistance*). Para a constituição do alvo foi escolhida uma lona branca, devido à resistência à água do material e a cor branca, que foi escolhida por se destacar bastante no campo, facilitando a observação do mesmo, como é sugerido por Redweik(2007). A figura 17 apresenta a metodologia do exército americano, enquanto que a figura 18 ilustra uma a obtenção do GSD em função da altura de 80 metros.

Figura 17–Parâmetros das medidas dos pontos de controle (a) gráfico de referência para medida de “d” em metros em função da escala de voo (b).



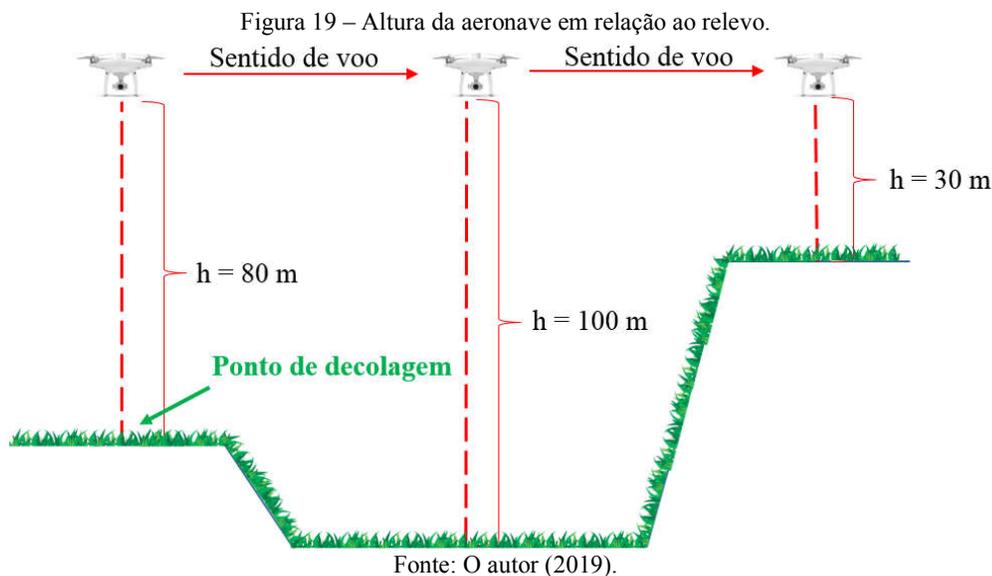
Fonte: Adaptado de Redweik(2007).

O GSD é um parâmetro que permite verificar se as dimensões dos pontos de controle são compatíveis com a altura de voo escolhida e com a qualidade gráfica da câmera. No caso Phantom 4 advanced a câmera é de 20 megapixel, portanto são cerca de 5000 pixels na horizontal por 4000 pixels na vertical.

Figura 18 – Exemplo da obtenção do GSD para uma altura de voo de 80m em uma Phantom 4 advanced.

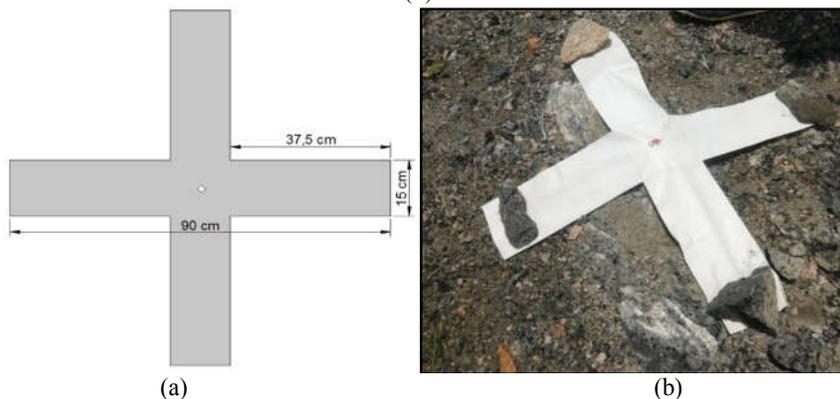


A altura de voo dos levantamentos aéreos foi de 80 metros, entretanto o ponto de decolagem foi a partir de uma das bancadas da pedreira, portanto a altura variou aproximadamente entre 80 a 110 metros devido a topográfica da cava. A figura 19 ilustra as variações de altura da aeronave em relação ao terreno dependendo do ponto de decolagem.



O ponto de controle foi construído considerando uma altura de voo de 120 metros, pois essa é a altitude máxima segundo a legislação vigente. Então, apesar de se basear no conceito do manual do exército americano, a relação utilizada foi adaptada, como mostra a figura 20, e nesse trabalho foi usado um valor de $d = 15 \text{ cm}$ e $6d = 90 \text{ cm}$. Essas dimensões também foram compatíveis com o GSD, por que a maior dimensão do ponto de controle (90 cm) possui cerca de 30 a 40 pixels, variando a quantidade de pixel de acordo com o a topografia do terreno. Apesar de existir uma variação do ponto mais baixo da cava para o ponto mais alto, cerca de 60 metros, o tamanho do ponto de controle foi satisfatório para a maior distância estabelecida entre o terreno e a aeronave, aproximadamente 100 metros. O ponto de controle também foi construído como uma peça única para otimizar a distribuição, traslado e instalação dos pontos.

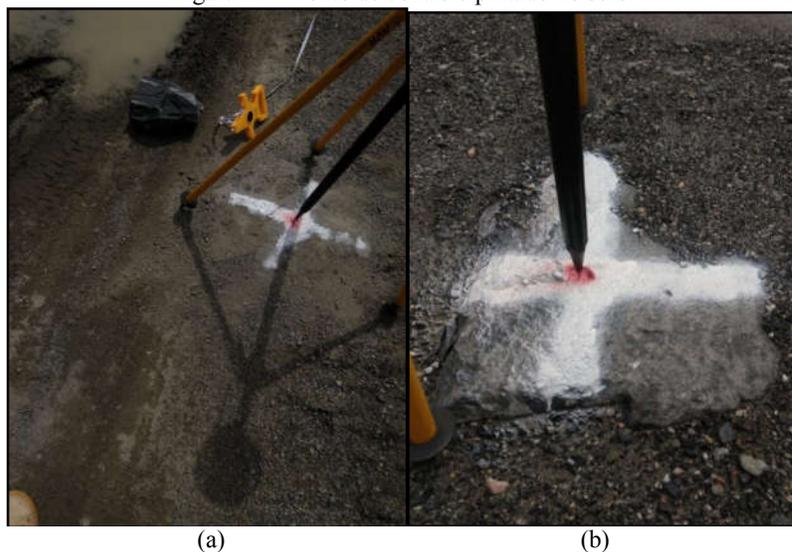
Figura 20–Diagrama do ponto de controle utilizado no projeto (a), imagem real do ponto de controle em campo (b).



Fonte: O autor (2019).

Como é mostrado na figura 21(a) existe uma pequena abertura no centro da marcação, a qual é útil para possibilitar a visualização do ponto no terreno, garantindo sua centralização. A figura 21(b) demonstra que, para fixar a marca no solo, foram utilizados fragmentos de rocha presentes no local. Na cava estudada, o terreno encontrado era basicamente o próprio maciço rochoso, impossibilitando a colocação de piquetes, sendo então utilizada tinta *spray*, nas cores branca e vermelha para marcar no solo os pontos georreferenciados como mostrado na figura 21. É importante lembrar que essa marcação de tinta *spraye* útil apenas para indicar onde serão colocados os pontos de controle móveis no momento em que for executado o levantamento aéreo.

Figura 21 – Ponto de controle pintado no solo.



Fonte: O autor (2019).

Após definir as dimensões dos pontos de controle foram realizados diversos levantamentos aéreos com o intuito de averiguar se o alvo era compatível com as necessidades do estudo. Na figura 22 é possível notar que a dimensão do ponto de controle foi compatível com a altura planejada no voo, portanto foi uma dimensão satisfatória para a proposta do estudo. Na imagem a aeronave está a 120 metros de altura, que foi a altitude limite para todos os levantamentos previstos, que no geral variaram entre 80 e 100 m.

Figura 22 – Visualização do ponto de controle da imagem capturada pela aeronave a 120 metros de altura (a) e mesmo ponto com zoom de 400% (b).

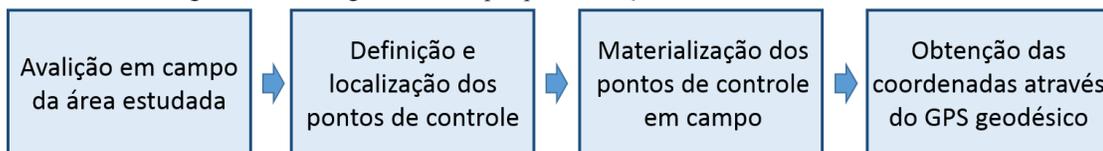


Fonte: O autor (2019).

3.3.2 Aquisição das coordenadas dos pontos de controle

As coordenadas dos pontos de controle foram obtidas em três momentos diferentes. Como se tratava de um empreendimento ativo, a pedreira estava sempre em processo de evolução, causando a obstrução de alguns pontos coletados, seja pelo avanço da mina ou devido a mudanças no arranjo do material. O método utilizado foi o PPK (*Post Processedkinematic*), Pós Processamento dos Dados. A figura 23 ilustra o fluxograma utilizado para obtenção das coordenadas na Pedreira Esperança.

Figura 23 – Fluxograma das etapas para obtenção das coordenadas verdadeiras.



Fonte: O autor (2019).

Os dados dos pontos de controle foram coletados através de um receptor de sinal geodésico (Topcon – Hyper V) de alta precisão, como é mostrado na figura 24. Foi utilizado o método estático de obtenção de coordenadas, no qual a base permaneceu coletando os dados dos satélites por cerca de 3 horas enquanto o tempo de permanência do *rover* em cada ponto foi de 10 minutos. Os pontos foram nomeados como p0, p1, p2, p3 até concluir o número de pontos desejado em cada momento. O ponto “p0” foi considerado sempre o ponto em que a base seria alocada.

Figura 24 – Levantamento dos pontos com receptor geodésico.

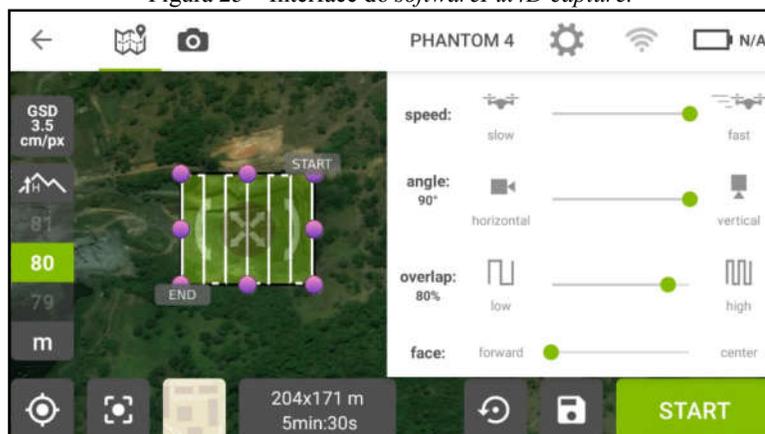


Fonte: O autor (2019).

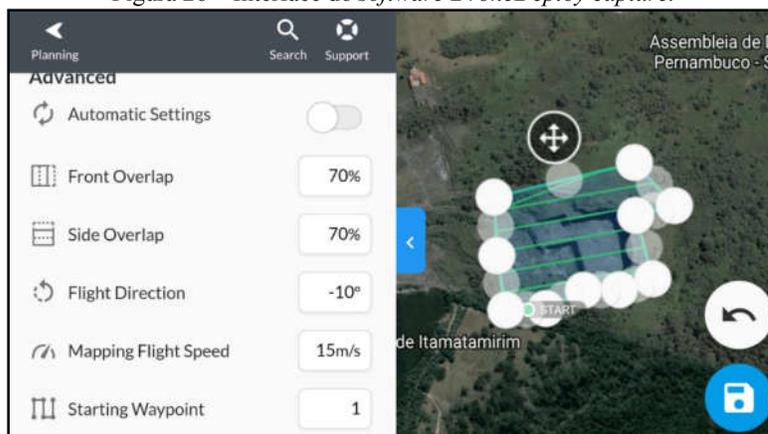
3.4 PLANO DE VOO

Antes de iniciar os levantamentos aéreos é fundamental a escolha do *software* que foi utilizado para a elaboração e execução dos levantamentos aéreos. Após uma pesquisa na *internet* foi constatado que os *softwares* mais utilizados são o *PIX4D Capture* e o *DroneDeploy*, ambos de caráter gratuito. Apesar de existirem outros aplicativos para essa tarefa, os dois selecionados apresentaram capacidade de suprir as necessidades do estudo, como foi confirmado por Correia Neto (2018).

Para a seleção do *software* a ser usado no projeto foi realizada uma avaliação levando em consideração aspectos como: versatilidade em campo, interface amigável, melhor conectividade e qualidade da elaboração do plano de voo. As figuras 25 e 26 ilustram a interface dos aplicativos para o planejamento de voo.

Figura 25 – Interface do *software Pix4D capture*.

Fonte: O autor (2019).

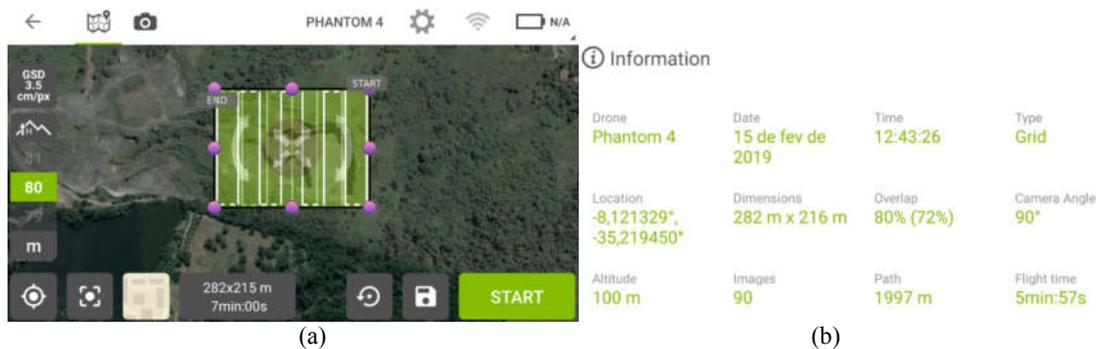
Figura 26 – Interface do *software DroneDeploy capture*.

Fonte: O autor (2019).

A principal diferença entre os aplicativos está ligada à necessidade de conexão com a rede de internet. Enquanto o *Pix4Dcapture* permite que o operador realize modificações do plano de voo mesmo sem conexão à internet, o *DroneDeploy* condiciona a alterações no projeto à conexão com a rede. A vantagem que pode-se destacar no *DroneDeploy* é o salvamento dos projetos de plano de voo em “nuvem”, permitindo o acesso a esses projetos de qualquer dispositivo, basta apenas efetuar o *login* no aplicativo.

Os levantamentos aéreos foram executados com uma configuração específica para otimizar o máximo possível o modelo gerado. O ângulo da câmera foi de 90°, a velocidade da aeronave foi de aproximadamente 15 m/s (velocidade suportada pelos aplicativos de voo que permitem a fotogrametria), a altura utilizada foi de 80 metros em relação ao ponto de decolagem do equipamento e a sobreposição utilizada foi de 80%. A figura 27 (a) apresenta a malha de voo utilizada e a figura 27 (b) as respectivas informações desse levantamento.

Figura 27 – Levantamento aéreo executado (a) e detalhamento das informações do voo (b).



Fonte: O autor (2019).

Alguns cuidados foram tomados antes de executar o levantamento, entre eles a escolha do horário do voo, que foram executados em sua maioria entre as 10:00 e as 14:00 do dia, para evitar a presença de sombras nas imagens. Também foi estabelecido que o ponto de início da coleta de imagens era o mais distante do ponto de decolagem ou o com pior visibilidade da aeronave, enquanto o ponto de finalização da malha de levantamento era o mais próximo possível do ponto de decolagem. Isso foi feito para gerenciar melhor a duração da bateria, evitando que a mesma se esgotasse muito longe do piloto. O gerenciamento da bateria é um importante fator do levantamento aéreo com drones, pois quando o procedimento é realizado em condições de vento forte, a autonomia da bateria cai consideravelmente já que é exigido maior esforço do motor para manter a aeronave estável.

O vento forte também atrapalha na tomada de imagens. Ao receber uma rajada de vento, o VANT se desestabiliza por um breve momento, prejudicando a captura da foto e, conseqüentemente, a qualidade das imagens obtidas. As imagens obtidas nessas condições apresentam falta de foco e pouca nitidez.

3.5 GERAÇÕES DOS MODELOS DE TERRENO E DE SUPERFÍCIE

Os modelos foram gerados em um *software* capaz de unificar as imagens tomadas pela aeronave. Foram determinados parâmetros distintos para o tipo e objetivo de cada modelo, e os modelos foram corrigidos a partir dos pontos de controle determinados em solo. Com os modelos prontos foram geradas curvas de nível para cada um deles e em seguida esses contornos topográficos foram otimizados em *software* do tipo *Computer Aided Design* (CAD).

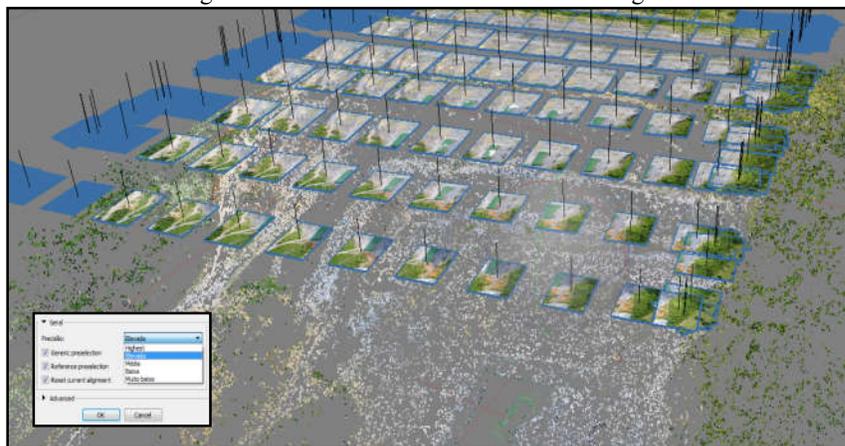
3.5.1 Softwares de Processamento de Imagens

Apesar de existirem diversos *softwares* para realizar o processamento das imagens, o *software* selecionado foi o *Agisoft Photoscan Professional* versão 4.0. Esse programa foi escolhido por ser uma ferramenta bastante conhecida no mercado para esse propósito, pela interface amigável, e também pela facilidade do acesso à informação proveniente de diversos cursos realizados na Universidade Federal de Pernambuco que utilizavam e indicavam esse *software* para processar imagens de obtidas de aerolevantamentos. Nesse trabalho foi utilizado a versão gratuita de 7 dias para gerar todos os modelos.

3.5.2 Alinhamentos das Imagens

Após a importação das imagens foi realizada a primeira etapa da modelagem, o alinhamento das imagens. Esse processo consiste no uso das informações das imagens tomadas e também a foto-identificação de pontos semelhantes presentes em duas ou mais fotos, para possibilitar a fotogrametria. A figura 28 ilustra o alinhamento das imagens e o local de captura de cada imagem. Nos modelos gerados nesse estudo sempre se buscou utilizar o alinhamento elevado, a fim de reduzir o tempo de processamento sem causar uma perda significativa da qualidade.

Figura 28 – Processo de alinhamento das imagens.



Fonte: O autor (2019).

O principal parâmetro a ser modificado na etapa de alinhamento é a qualidade do filtro das imagens de VANT, que nesse aplicativo varia de muito baixa a muito elevada. Ao trabalhar com a qualidade “*highest*” o tempo de processamento é maior e o número de erros ou inconsistências no modelo é menor. Ao criar um modelo e nele forem identificados

espaços vazios, é interessante reduzir a qualidade do filtro de alinhamento, para permitir o uso de alguns pontos que não foram usados e assim cobrir esses espaços. A figura 29, referente ao levantamento de uma fonte de produção de água mineral em local isolado, apresenta a interferência desse parâmetro nos modelos de superfície gerados.

Figura 29 – Alinhamento das imagens em “highest” (a) e alinhamento de qualidade média(b).



Fonte: O autor (2019).

3.5.3 Utilizações dos Pontos de Controle na Correção das Imagens

Nessa etapa foram usados os pontos de controle para corrigir as imagens. O processo consiste na importação das coordenadas obtidas através do levantamento com o GPS geodésico e em seguida na retificação das imagens em função dessas coordenadas. A figura 30 mostra como foi feita essa correção, na qual a coordenada foi realocada em função do ponto de controle presente na imagem. Esse processo é repetido para todas as imagens que contenham o ponto de controle em questão. Antes de iniciar as correções é necessário definir no programa o sistema de coordenada que será utilizado no trabalho e só então importar as coordenadas dos pontos de controle compatíveis com esse sistema. Neste projeto todas as coordenadas foram definidas em UTM. Após as correções de coordenadas reais realizadas com os pontos de controle é necessário otimizar o modelo utilizando essas imagens como referência.

Figura 30 – Pontos de controle antes da correção (a) e ponto de controle após a correção (b).



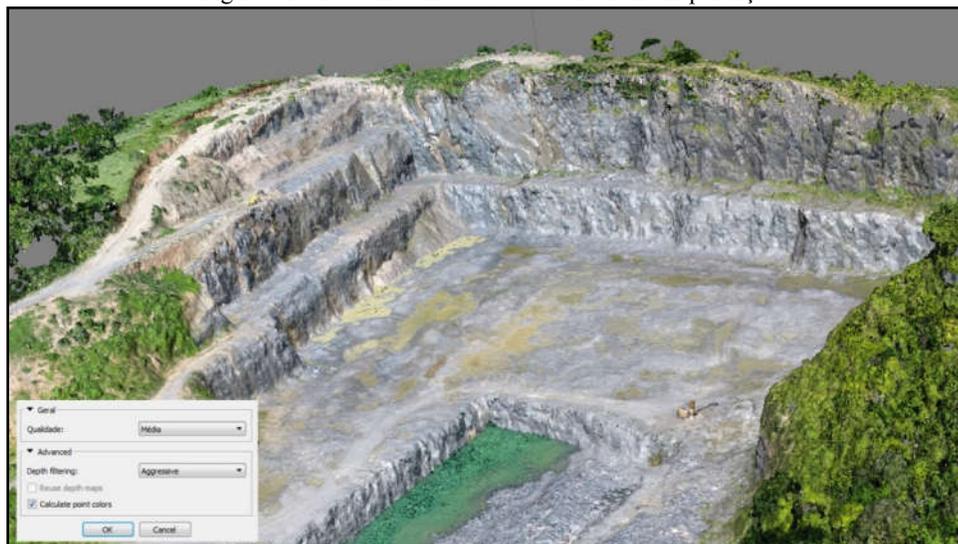
(a) (b)

Fonte: O autor (2019).

3.5.4 Construção da Nuvem Densa

Para a construção da nuvem densa, similar ao alinhamento das imagens, deve-se definir o nível de qualidade da nuvem de pontos, que varia entreultraelevada e muito baixa. Embora o detalhamento do modelo seja maior ao utilizar as opções de maior qualidade, o tempo de processamento dela e das etapas subsequentes cresce vertiginosamente. Entretanto, utilizar as qualidades mais baixas resulta em um modelo pouco representativo e mal definido. Dessa forma, optou-se pelo uso da qualidade média em todos os levantamentos realizados para a construção da dissertação. Quanto ao parâmetro de *depthfiltering* foi mantido o indicado pelo *software*, a opção *aggressive*. A figura 31 ilustra a etapa de construção da nuvem densa do modelo da Pedreira Esperança.

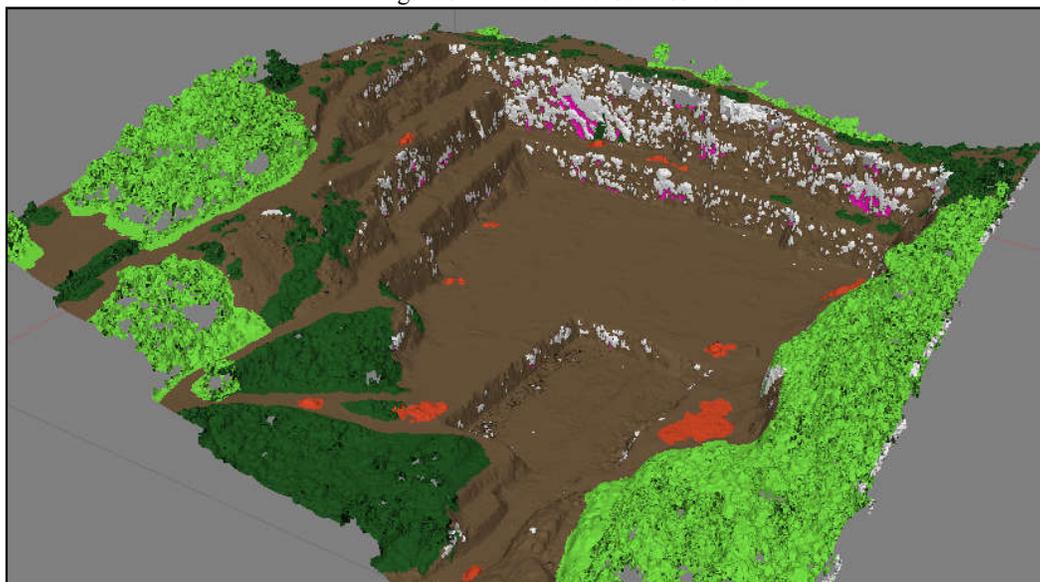
Figura 31 – Nuvem densa da cava da Pedreira Esperança.



Fonte: O autor (2019).

Após a nuvem densa ser gerada é possível realizar a separação dos pontos em diferentes classes, dentre as quais destacam-se construções, vegetação e terreno. Essa classificação permite a filtragem dos dados na construção do modelo, a exclusão de determinadas classes e construção do modelo apenas com os pontos desejados. A figura 32 ilustra os parâmetros utilizados no *software* e o resultado dessa classificação na nuvem densa. Na qual os equipamentos e blocos encontrados na cava foram classificados na cor vermelha, a vegetação alta na cor verde claro e a vegetação baixa na cor verde escuro.

Figura 32 – Nuvem densa classificada.

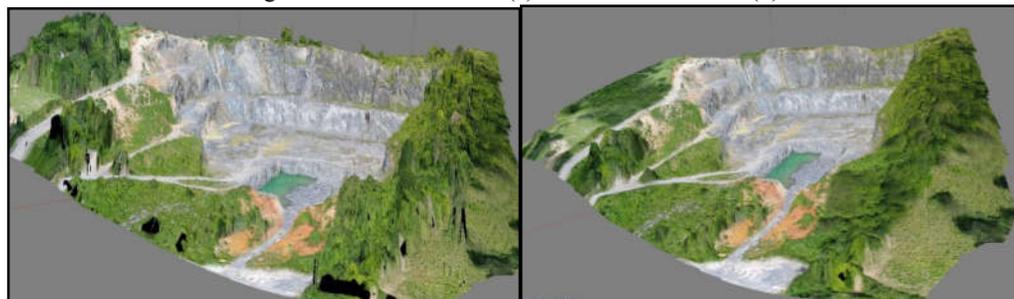


Fonte: O autor (2019).

3.5.5 Construção do Modelo Geométrico (*mesh*)

A produção da malha para o modelo, seja ele um MDS ou um MDT, é a etapa que deve ser realizada com maior atenção. Depois de definir e classificar os pontos da nuvem densa é possível a geração do modelo geométrico de acordo com as especificações necessárias, entretanto, na maioria dos casos, o primeiro modelo gerado não contempla todas as necessidades do projeto, sendo necessárias novas classificações de pontos da nuvem densa (modificando os parâmetros) e a repetição do processo até alcançar o modelo ideal para cada trabalho. Neste projeto o principal objetivo era o MDT, portanto foi necessária a retirada da vegetação da cava, alguns blocos situados no pátio e equipamentos usados na lavra. Na figura 33(a) é apresentado um modelo geométrico que não passou por um trabalho de classificação, enquanto a figura 33(b) mostra o modelo trabalhado e filtrado.

Figura 33 – Modelo bruto (a) e modelo trabalhado (b).



(a) (b)

Fonte: O autor (2019).

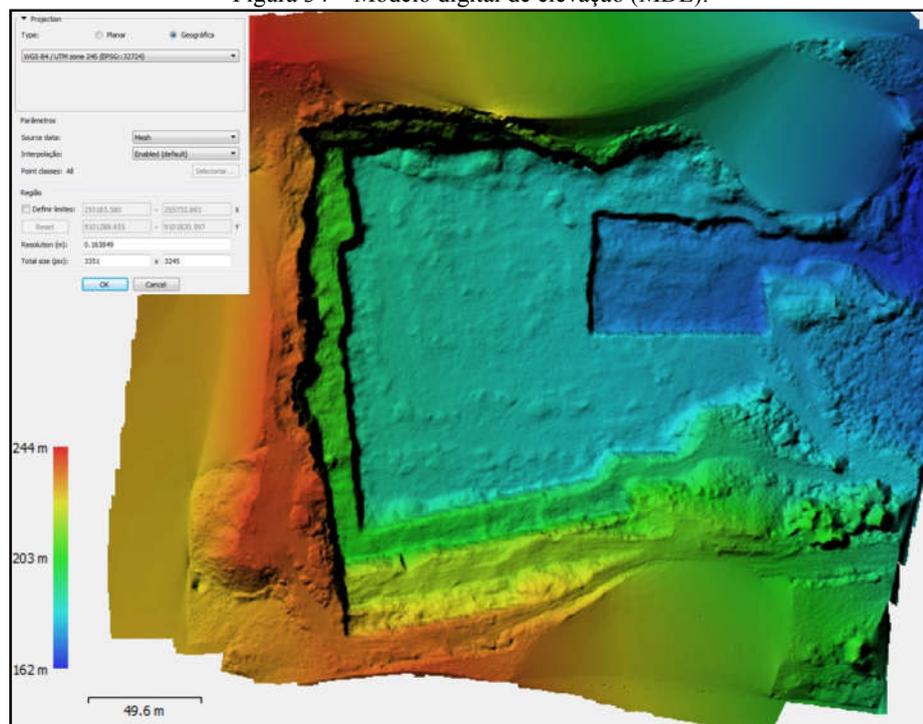
3.5.6 Texturização do Modelo

Com o modelo já construído é atribuída uma textura, que tem como função corrigir pequenas falhas do modelo e melhorar a definição e a qualidade gráfica do projeto. Nessa etapa os parâmetros utilizados foram os mesmos recomendados pelos *softwares*, ou seja, modo de mapeamento genérico e modo de combinação *mosaic (default)*.

3.5.7 Construção do Modelo Digital de Elevação

A construção do Modelo Digital de Elevação (MDE) é a etapa fundamental para a coleta de informações do modelo. O MDE pode ser gerado a partir dos dados da nuvem densa, da nuvem escassa e da malha geométrica. Ao usar a nuvem densa ou a nuvem escassa para gerar o MDE o mesmo representa a superfície e se torna um modelo digital de superfície (MDS), enquanto ao usar a malha, que anteriormente passou por um processo de filtragem, é gerado o Modelo Digital do Terreno (MDT). Para obter as curvas de nível da cava foi utilizada a malha geométrica como parâmetro de construção do MDE, retirando desse modelo a vegetação e outros objetos que não fazem parte do terreno. Nessa etapa é importante construir o modelo no mesmo sistema de coordenadas definidos no início do projeto e que também foi usado nos pontos de controle. A figura 34 apresenta o resultado do MDE criado a partir da malha.

Figura 34 – Modelo digital de elevação (MDE).



Fonte: O autor (2019).

Nesse MDE é possível visualizar um gradiente de cor definido em função das altitudes, facilitando assim a visualização das bancadas, além de apresentar a escala do modelo. Entre os parâmetros ilustrados na figura 36, não foram alterados os valores de resolução nem mesmo o número total de *pixel*, já determinado pelo *software* automaticamente após a escolha de parâmetros anteriores.

3.5.8 Orthomosaic

A construção do ortomosaico consiste em uma reprodução da sobreposição das imagens, tornando-as uma só imagem que engloba todas as imagens coletadas, e criando um mosaico de alta resolução, no qual podem ser identificados detalhes do local levantado com o VANT. Ao criar o ortomosaico é preciso definir o sistema de coordenadas que será utilizado. Em seguida, é determinado o parâmetro de superfície que pode ser escolhido entre o MDE e a malha geométrica, sendo nesse ponto importante determinar qual dos dois modelos possui as características pertinentes ao objetivo final do trabalho. A figura 35 ilustra o resultado de um ortomosaico elaborado na Pedreira Esperança.

Figura 35 – Imagem ortomosaico da Pedreira Esperança.



Fonte: O autor (2019).

É importante que a imagem ortomosaico seja criada de modo a representar da melhor forma possível a topografia local, para que, nos processos seguintes de obtenção de curvas de nível e de medidas de volume e área, sejam obtidos resultados o mais próximo possível da realidade, excluindo ruídos de vegetação e estruturas.

3.6 OBTENÇÃO DE DADOS A PARTIR DO MODELO GERADO

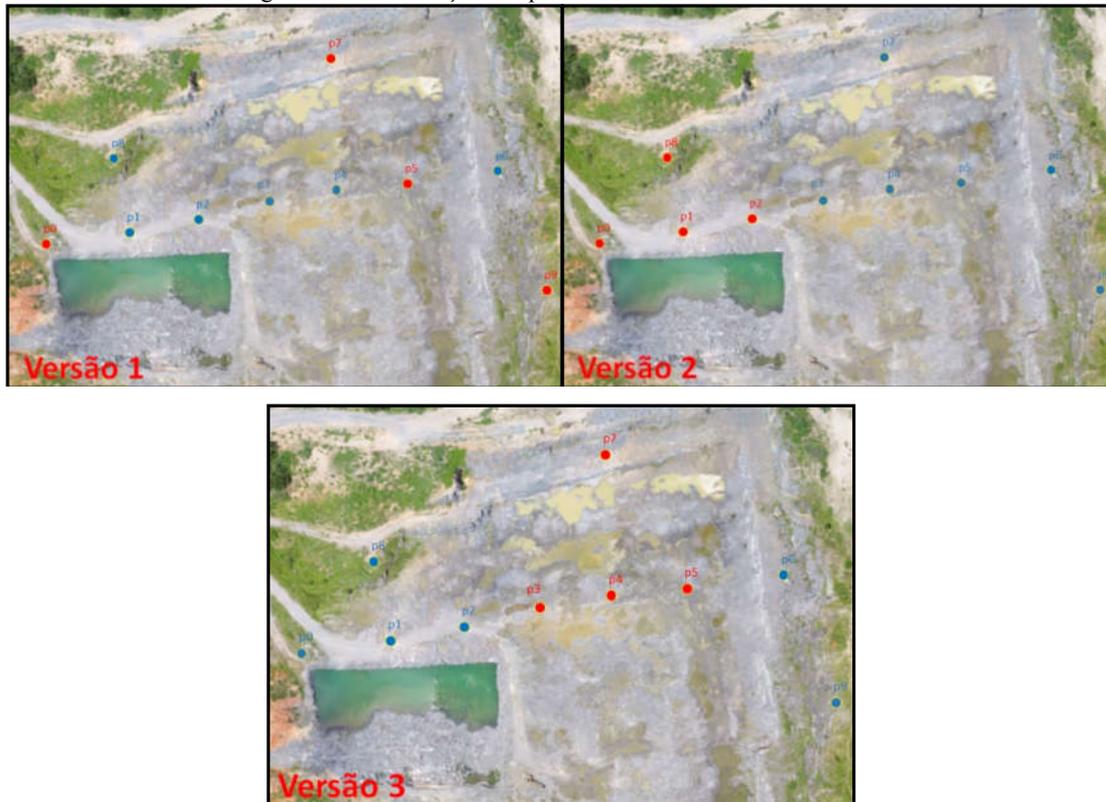
De modelo gerado podem ser extraídas diversas informações sobre o local levantado em pouco tempo, entre elas pode-se destacar as curvas de nível do modelo e o volume de pontos de interesse.

3.6.1 Obtenção de Coordenadas de Interesse

Para avaliar a qualidade da distribuição dos pontos de controle e verificar o comportamento dos pontos de checagem, foi utilizado um modelo obtido em fevereiro de 2019, o qual foi ajustado 3 vezes de maneira distintas. Primeiro, Foi criada uma versão com pontos distribuídos de modo a abranger o máximo da superfície. Em seguida foram criadas duas versões em que 4 (quatro) pontos de controle estão polarizados e os demais pontos foram

usados como pontos de checagem. Na imagem 36 é ilustrada a localização dos pontos de controle em cada versão.

Figura 36 – Localização dos pontos de controle em cada versão.



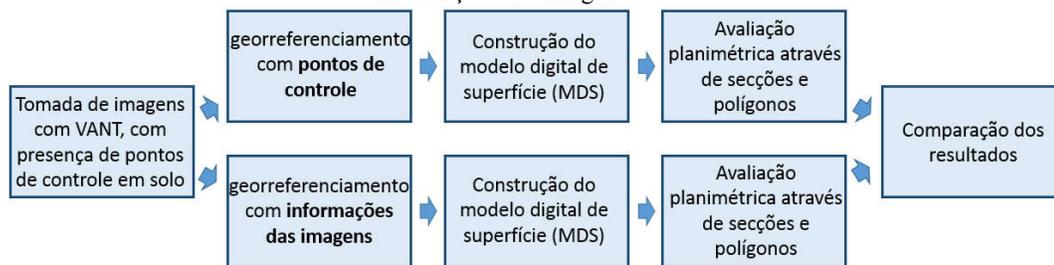
Fonte: O autor (2019).

As versões foram analisadas separadamente através do *software AgisoftPhotoscan*, que determina o erro individual de cada eixo de maneira linear e avalia o erro total através da distância entre o ponto real e o ponto no modelo criado.

3.6.2 Influência dos Pontos de Controle nas Informações Geométricas do Modelo Digital

A análise foi realizada com o modelo de 2019. Foi comparando o modelo digital georreferenciado com pontos de controle (Versão 1) e outro georreferenciado com base nas coordenadas obtidas pela própria aeronave. A figura 37 apresenta o fluxograma para essa comparação.

Figura 37 – Fluxograma da comparação entre o modelo retificado através dos PC e outro através das informações das imagens aéreas.



Fonte: O autor (2019).

Para realizar a comparação entre os produtos gerados foi criado um polígono e uma seção, nos dois modelos, no *Agisoft Photoscan 4.0* para avaliar as medidas geométricas referentes a comprimento, área e volume. Na criação dessas figuras foram utilizados os pontos de controle presentes em campo como vértices por estes serem pontos em comum entre o modelo corrigido e o não corrigido. Na figura 38 são ilustrados a seção e o polígono construídos em ambas as metodologias no Modelo Digital de Superfície de 2019.

Figura 38 – Linha e polígono construído no modelo da pedreira esperança de 2019.

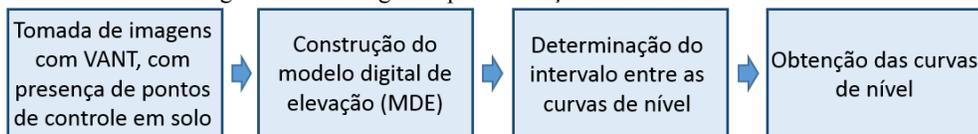


Fonte: O autor (2019).

3.6.3 Curvas de Nível

Após a construção do modelo o *software Agisoft photoscan* permite gerar curvas de nível como intervalo definido pelo objetivo do trabalho. As curvas de nível são criadas em função do Modelo Digital de Elevação (MDE), que por sua vez utiliza as informações da malha do modelo para ser construído após uma classificação de pontos. A figura 39 apresenta o fluxograma utilizado para obtenção das curvas de nível através do *software Agisoft photoscan*.

Figura 39 – Fluxograma para obtenção das curvas de nível.



Fonte: O autor (2019).

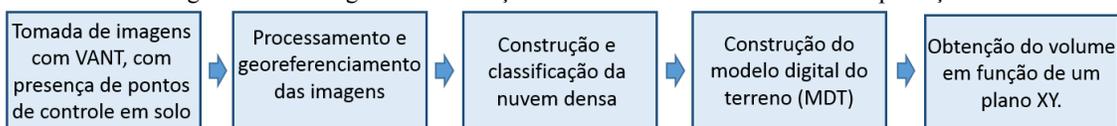
As configurações permitem a determinação da altura mínima, máxima e o valor do intervalo entre as curvas. Com o intuito de verificar a necessidade de realizar um trabalho de limpeza da superfície foram gerados dois conjuntos de curvas de nível: a primeira foi criada a partir do modelo bruto, enquanto a segunda foi criada após o MDE já estar devidamente filtrado, ou seja, retirada da vegetação, objetos e edificações. Em ambos os modelos das curvas de nível o intervalo utilizado foi de 0,5m.

A preparação para construção das curvas de nível, que representem o terreno, é iniciada após a nuvem densa ser classificada. Em seguida é construída uma malha apenas com os pontos de interesse. Então é gerado o MDE, que servirá de base para geração das curvas de nível. Já com as curvas de nível geradas no Agisoft Photoscan elas podem ser exportadas para uma plataforma CAD, onde são excluídos os ruídos e as linhas são suavizadas, caso necessário.

3.6.4 Comparações do Volume obtido no Modelo com o Volume Real Produzido

Na cava da Pedreira Esperança foram executados diversos levantamentos com o intuito de gerar modelos e aperfeiçoar a técnica. Entre esses modelos foram selecionados os modelos criados em 2017 e 2019, considerando um intervalo de cerca de um ano entre os levantamentos, para realizar uma comparação volumétrica entre o modelo inicial (2017) e final (2019) e determinar o quanto de volume de material foi extraído nesse período. A figura 40 ilustra o fluxograma seguido para obtenção dessas informações.

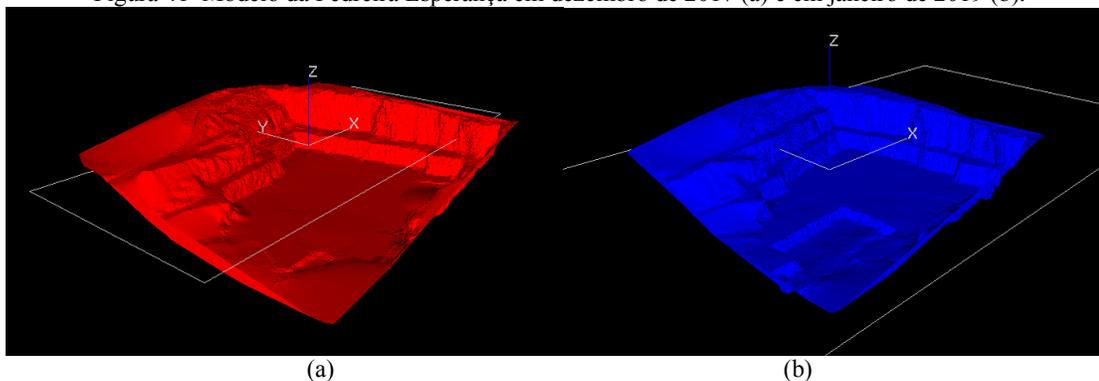
Figura 40 – Fluxograma da obtenção do volume da cava da Pedreira Esperança.



Fonte: O autor (2019).

Na figura 41 é possível observar os modelos produzidos em dezembro de 2017 (a) e outro em janeiro de 2019 (b), respectivamente, que permitem a análise do volume total *in situ* extraído ao longo do ano de 2018. Para determinação do volume foi definido o plano XY ($Z=185$), em ambos os modelos, como referência. Esse valor do eixo Z foi escolhido por ser menor que a menor cota de qualquer um dos modelos estudados.

Figura 41–Modelo da Pedreira Esperança em dezembro de 2017 (a) e em janeiro de 2019 (b).



Fonte: O autor (2019).

Em seguida foram obtidos junto à empresa o volume de material de produção comercializado nesse período, para assim poder-se comparar o volume de material extraído na pedreira através do modelo elaborado com a produção real de brita no período. O modelo da cava construído a partir do levantamento realizado em 2019 apresenta pequenos erros *nawireframe* devido ao detalhamento das curvas de nível, mas não impacta de maneira significativa o resultado volumétrico do mesmo.

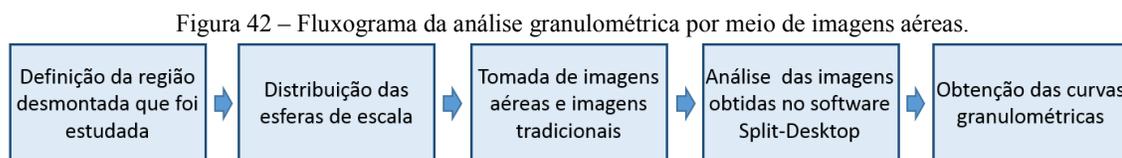
3.6.5 Comparação entre a Metodologia Convencional de Levantamento Topográfico e a Topografia realizada por meio do Levantamento Aéreo com VANT

Foi executado um levantamento topográfico da cava da Pedreira Esperança por meio de uma estação total, seguindo a metodologia tradicional (ré, vante e azimute) e também foi realizado o levantamento aéreo da cava nas mesmas condições, sem que antes houvesse qualquer mudança geométrica da cava, com o uso de VANT. A topografia convencional foi executada por uma empresa especializada e que já era responsável por essa tarefa em outras ocasiões. O intuito foi verificar a qualidade do resultado e a representatividade do modelo da cava gerado. Esses levantamentos foram realizados no segundo semestre de 2018, as imagens aéreas foram coletadas em apenas um plano de voo e durou cerca de 2 horas, considerando o

tempo de execução do voo e distribuição dos pontos de controle, enquanto o topógrafo levou cerca de 16h (2 expedientes).

3.6.6 Análise Granulométrica com Imagens Aéreas

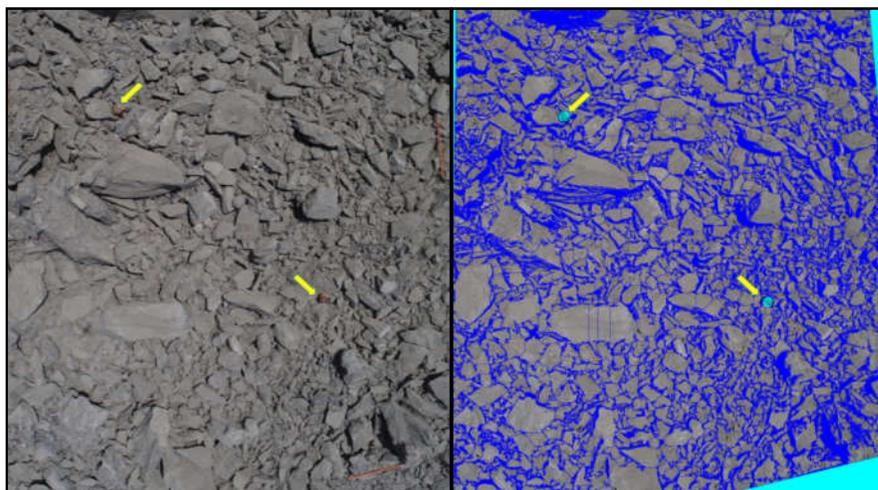
Após um desmorte de rocha efetuado na Pedreira Esperança, foram coletadas imagens aéreas por meio do VANT, para realizar uma análise granulométrica do produto. Em seguida foram tomadas imagens em solo, para realizar o mesmo procedimento. Em ambos os casos foram utilizadas bolas de basquete, com diâmetro de 25 cm, como parâmetro de escala. Na figura 42 é ilustrado o fluxograma dessa atividade.



Fonte: O autor (2019).

As bolas de basquete foram distribuídas de modo a ficarem bem visíveis e foram utilizadas ao menos 2 (duas) em cada imagem. As fotos foram processadas de maneira automática pelo *software Split-Desktop 4.0* e então as curvas de nível geradas por cada uma das metodologias foram comparadas posteriormente. A figura 43 ilustra uma imagem obtida a partir do VANT e como ela foi avaliada pelo *software*.

Figura 43 – Imagem aérea obtida por meio do VANT (a) e imagem processada no *software Split-Desktop* de modo automático.



(a) (b)

Fonte: O autor (2019).

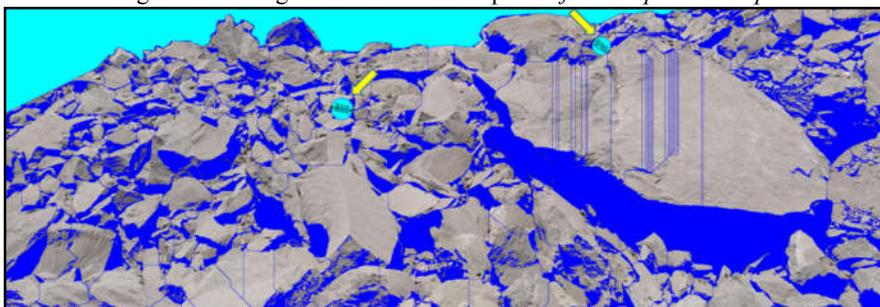
Em seguida no mesmo local foi tomada uma imagem no terreno com as esferas de referência novamente distribuídas de modo a ficarem visíveis na imagem. Essa imagem foi processada no *Split-Desktop 4.0* de forma automática. Nas figuras 44 e 45 é apresentada a imagem e como ela foi entendida pelo *software*.

Figura 44 – Imagem tomada no solo.



Fonte: O autor (2019).

Figura 45 – Imagem de solo avaliada pelo *software Split-Desktop*.



Fonte: O autor (2019).

Embora seja possível notar que na figura 45 alguns blocos foram interpretados de modo equivocado pelo *software*, esse erro foi mantido para manter a metodologia igualmente usada tanto na imagem aérea quanto na fotografia convencional, ou seja, sem realizar nenhum tipo de ajuste após a avaliação automática do *software*.

Este procedimento foi realizado em quatro setores da pilha do material desmontado, com uma foto convencional correspondente a uma foto aérea do mesmo local. Em seguida tais fotos foram analisadas em dois conjuntos, sendo um conjunto formado pelas fotos aéreas e o outro pelas fotos convencionais, e então foi gerada uma curva granulométrica para cada conjunto para fins de comparação.

3.6.7 Verificação da Bancada de Desmonte

A preparação da bancada de desmonte é um procedimento comum em um empreendimento mineiro, mas dependendo da dimensão do plano de fogo é possível que ocorram erros na malha de perfuração ou até mesmo na amarração dos explosivos. Por isso, a capacidade de avaliar a bancada como um todo, tanto os parâmetros relativos ao plano de fogo quanto a sua estrutura e geologia, é capaz de minimizar problemas nesse momento. Então foi realizado um levantamento aéreo, com o VANT, em uma bancada perfurada já com os furos carregados e as amarrações concluídas. A figura 46 ilustra o procedimento executado.

Figura 46 – Fluxograma do levantamento aéreo da bancada.



Fonte: O autor (2019).

Esse levantamento foi realizado manualmente com o VANT, sem a utilização do plano de voo, sendo a aeronave posicionada a cerca de 4 metros de altura da bancada e movimentada paralelamente com relação ao piso da bancada até abranger todo o plano de fogo. Os furos carregados foram marcados com tinta branca na superfície. Em seguida, foi realizado o mesmo procedimento com a frente da bancada para avaliar as famílias de fratura presentes. No procedimento não foram utilizados pontos de controle, pois como se trata de uma área pequena, a inserção de pontos de controle, na metodologia estática, todas as vezes que fosse realizado um plano de fogo tornaria a tarefa dispendiosa. Para melhor a qualidade do produto, foi utilizado como parâmetros o valor de distâncias já conhecidas. A figura 47 apresenta a bancada que foi estudada.

Figura 47 – Localização da bancada estudada.



Fonte: O autor (2019).

Da bancada estudada foi observado à malha de desmonte, a presença de família de fraturas e as amarrações. Alguns furos foram marcados com a coloração vermelha para verificar se o uso dessa cor teria maior contraste com a bancada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados encontrados neste trabalho foram descritos e discutidos nos tópicos a seguir.

4.1 DEFINIÇÃO DO VANT

Após a pesquisa, o equipamento selecionado foi o *DJI phantom 4 Advanced*(figura 48), o qual, apesar de não ser o mais moderno de sua série, é munido de uma câmera fotográfica (4K) de alta resolução que em termos de qualidade de imagem é igual ao dos seus sucessores, o *DJI phantom 4 Pro*, *DJIphantom 4 Pro+* e *DJI Phantom 4 Pro Plus*. Os modelos mais modernos apresentam um maior número de sensores, entretanto para a forma com que os levantamentos foram planejados o número de sensores é um parâmetro irrelevante, visto que os mesmos estão inativos durante os voos planejados em *softwares*.

Figura 48 – *Phantom 4 advanced* e seus componentes.



Fonte: O autor (2019).

Apesar de possuir uma autonomia de voo limitada, correspondente a cerca de 22 minutos conforme as condições de velocidade dos ventos, o equipamento é bastante estável no ar, o que garante maior precisão na tomada de fotos. O VANT tipo asa fixa foi descartado durante a escolha, pois embora possua maior autonomia de voo, ele necessita de maiores cuidados na decolagem e uma condição de terreno mais favorável, que eventualmente não são encontradas em áreas de minerações, além de ser um equipamento de alto custo em relação ao *Phantom 4 advanced*. A tabela 5 apresenta a ficha técnica da aeronave escolhida.

Tabela 5 - Especificações da aeronave selecionada.

Aeronave	Phantom 4 Advanced
Peso	1368 g
Tempo de voo máximo	30 min
Sensor de obstáculo	Frontal
Câmera sensor	1" CMOS (20 Mp)
Resolução de vídeo máxima	4K (60P)
Frequência de operação	2.4 GHz

Fonte: O autor (2019).

4.2 DESCRICÃO DOS PONTOS DE CONTROLE OBTIDOS

O primeiro conjunto de pontos de controle foi obtido no dia 21 de dezembro de 2017. À época foram obtidos 4 pontos de controle, apresentados na figura 49, sendo que o ponto de decolagem do VANT foi nas proximidades do ponto p4 e a base do equipamento no ponto p0.

Figura 49–Mapa com pontos de controle obtidos no primeiro levantamento.



Fonte: O autor (2019).

As coordenadas obtidas nesse primeiro levantamento estão dispostas na tabela 6, e os dados da base foram obtidos com relação ao marco geodésico localizado na Biblioteca Central da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). O sistema utilizado é o SIRGAS 2000, zona 25 S.

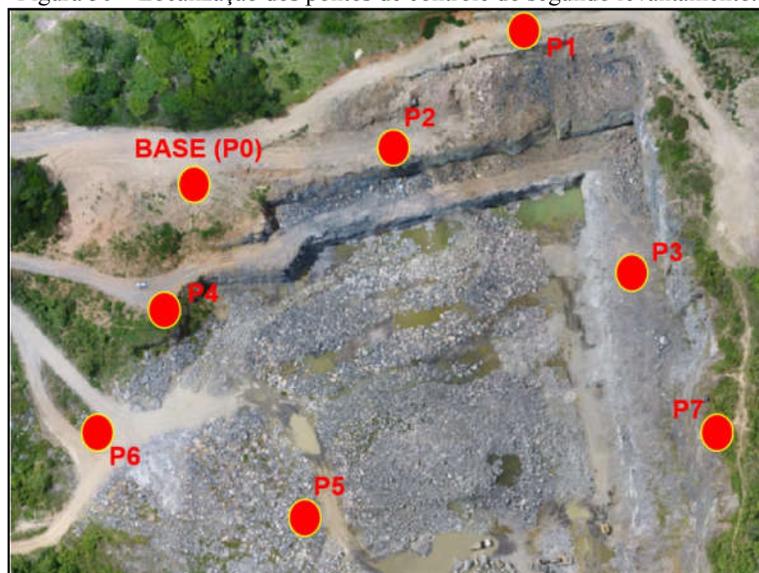
Tabela 6 – Coordenadas do primeiro levantamento.

Pontos	Leste	Sul	Elevação
p0 (base)	255.326,812000	9.101.600,483000	192,464
p1	255.359,240000	9.101.644,489000	205,683
p2	255.425,674000	9.101.629,228000	192,154
p3	255.547,034000	9.101.595,501000	237,372

Fonte: O autor (2019).

O segundo levantamento foi realizado após alguns meses do primeiro, agora com maior experiência e facilidade no planejamento do voo. Esse levantamento foi executado no dia 13 de março de 2018 e permitiu a obtenção de 8 pontos de controle, justamente para verificar se com um maior número de coordenadas o modelo apresentaria maior precisão, além de possibilitar a utilização de pontos de checagem, visto que no primeiro levantamento o pequeno número de pontos dificultaria o uso de algum deles para a finalidade de checagem do modelo. Na figura 50 são ilustrados os pontos de controle desse levantamento e a tabela 7 apresenta as coordenadas obtidas.

Figura 50 – Localização dos pontos de controle do segundo levantamento.



Fonte: O autor (2019).

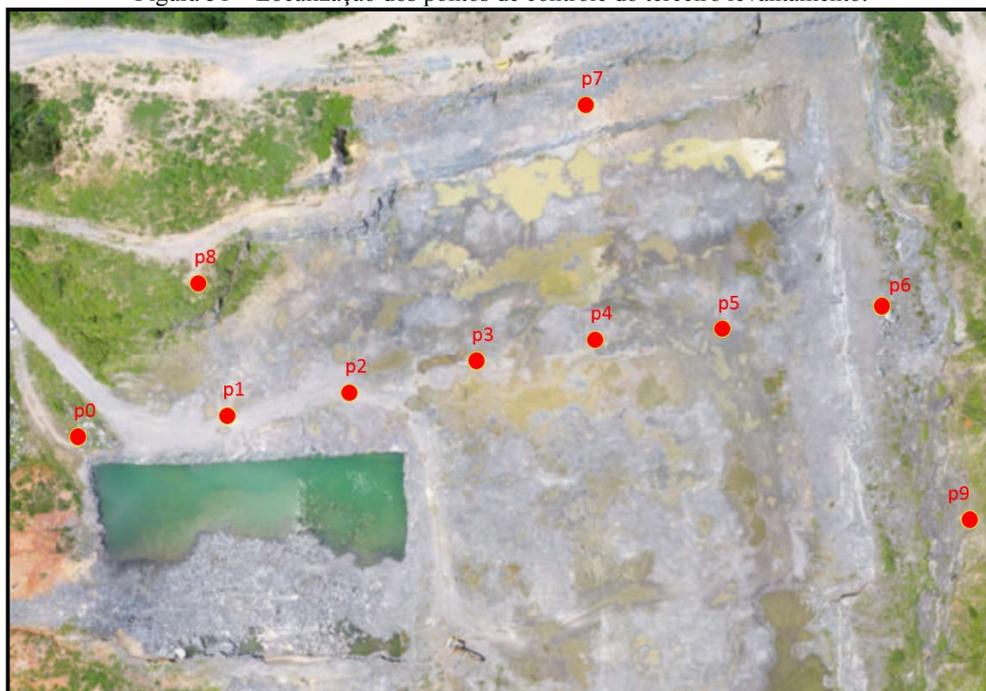
Tabela 7 – Coordenadas do segundo levantamento.

Pontos	Leste	Sul	Elevação
p0 (Base)	255.367,184527	9.101.686,74320	222,573
p1	255.472,479953	9.101.743,33701	238,850
p2	255.428,853544	9.101.700,13496	224,274
p3	255.512,626884	9.101.655,75226	208,010
p4	255.359,364010	9.101.643,03673	204,307
p5	255.414,595164	9.101.581,11487	195,454
p6	255.338,416093	9.101.604,43058	191,449
p7	255.547,034000	9.101.595,50100	237,372

Fonte: O autor (2019).

Por fim foi realizado um levantamento no dia 15 de fevereiro de 2019. Como no levantamento anterior foi observado que o número de pontos de controles já era mais que o suficiente para essa área de estudo, nesse novo levantamento buscou-se dispor os pontos de maneira diferente para uma futura análise de acurácia entre os pontos de checagem e de controle. A figura 51 ilustra esse último levantamento, no qual os pontos de controle estão com cerca de 30 m de distância mínima entre eles. A tabela 8 apresenta as coordenadas desses pontos.

Figura 51 – Localização dos pontos de controle do terceiro levantamento.



Fonte: O autor(2019).

Tabela 8 – Coordenadas do terceiro levantamento.

Pontos	Leste	Sul	Elevação
p0 (Base)	255339.608	9101605.312	193,437
p1	255369.138	9101611.058	193.100
p2	255397.839	9101620.167	192.854
p3	255426.514	9101627.940	192.631
p4	255457.123	9101635.562	192.952
p5	255488.023	9101638.099	192.708
p6	255526.063	9101645.586	208.732
p7	255450.400	9101689.733	207.154
p8	255359.166	9101643.189	205.990
p9	255547.034	9101595.501	237.372

Fonte: O autor (2019).

Como a cava da Pedreira Esperança estava ativa, os levantamentos foram executados em momentos em que não houvesse prejuízo para a execução das operações, e então foi necessária uma flexibilização dos horários em que foram realizados os voos. Todos os pontos de controle foram perdidos em função do avanço da lavra, exceto o mais alto, que no primeiro levantamento foi denominado como p3, no segundo como p7 e no último como p9.

A distribuição dos pontos de controle, nesse modelo de 2019, foi feita de modo ligeiramente diferente para fins de realização de uma análise do erro encontrado à escolha da localização dos pontos que foram utilizados como referência. Para essa comparação os pontos georreferenciados foram classificados em pontos de controle e pontos de checagem. A tabela 9 apresenta essa distribuição.

Tabela 9 – Distribuição dos pontos em grupos.

Pontos Georreferenciados		
Versões	Pontos de controle	Pontos de checagem
1	p0, p5, p7, p9	p1, p2, p3, p4, p6, p8
2	p0, p1, p2, p8	p3, p4, p5, p6, p7, p9
3	p3, p4, p5, p7	p0, p1, p2, p6, p8, p9

Fonte: O autor (2019).

4.3 ANÁLISE DOS PONTOS DE CONTROLE

Os pontos de controle artificiais localizados na cava da Pedreira Esperança funcionaram de maneira satisfatória em todos os modelos gerados, pois na maioria dos casos foi possível identificar e corrigir os pontos. Entretanto, foi constatado que pontos próximos a grandes variações de elevação, que no caso de uma cava seria a bancada, os pontos devem ser

dispostos a uma distância razoável do pé da bancada, para evitar que sua visualização seja obstruída pelo próprio maciço rochoso. Esse fato também sofre influência pela altura escolhida para executar o voo.

4.4 AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE

Foram realizadas as análises de três modelos digitais obtidos em épocas diferentes da Pedreira Esperança, visando identificar o avanço da cava e as modificações ocorridas na topografia local nesse espaço de tempo.

4.4.1 Modelo 2017

O primeiro levantamento da cava para fins de estudos foi o modelo de 2017. O método para realizar com maior qualidade esse levantamento foi adequado nos modelos posteriores e por esse motivo não esse modelo possui uma menor quantidade de pontos de controle e checagem. A tabela 10 ilustra o resultado do erro encontrado nesse modelo.

Tabela 10 – Erros do modelo de 2018.

Pontos (controle)	X erro(m)	Y erro(m)	Z erro(m)	Total erro(m)
P1	- 0,0048394	0,000416973	-0,0012612	0,0050184
P2	0,0140768	-0,00326097	0,00883089	0,0169345
P4	0,00197446	0,00113341	0,00602343	0,00643932
Total	0,0086694	0,00200769	0,00621442	0,010854

Pontos (check)	X erro(m)	Y erro(m)	Z erro(m)	Total erro(m)
P3	-0,0100262	0,00341283	-0,0120184	0,0160191
Total	0,0100262	0,00341283	0,0120184	0,0160191

Fonte: O autor (2019).

Para classificar o modelo quanto a PEC foi necessário determinar o erro total planimétrico e altimétrico e seus respectivos desvios padrões e PEC's. Na tabela 11 são apresentadas essas informações. O erro planimétrico corresponde a distância entre pontos no plano, enquanto que o erro altimétrico corresponde ao erro na elevação (eixo Z).

Tabela 11 - Determinação do PEC para o modelo 2017.

Parâmetros	Erro planimétrico total (m)	Erro altimétrico total Z(m)
Média	0,0080	0,0004
Desvio Padrão (DP)	0,0055	0,0093
PEC (1,6449*DP)	0,0091	0,0153

Fonte: O autor (2019).

Como é possível observar a PEC se encaixa dentro dos limites estabelecidos para classificação “A”, que para planimetria seria $PEC \leq 0,28m$ e $DP \leq 0,17m$ e para a elevação $PEC \leq 0,27m$ e $DP \leq 0,17m$ na escala de 1:1000, garantindo assim a qualidade do resultado obtido.

4.4.2 Modelo 2018

O modelo construído a partir das imagens do levantamento aéreo de 2018 apresentou uma margem de erro total bastante superior ao encontrado nos modelos de 2017 e 2019. A tabela 12 apresenta o resultado desse levantamento quanto à qualidade os pontos encontrados. Apesar de mudanças na escolha dos pontos de controle e checagem no modelo de 2018 não foi possível obter um erro total inferior a 10 cm em nenhum dos pontos.

Tabela 12 – Erros do modelo de 2018.

Pontos (controle)	X erro(m)	Y erro(m)	Z erro(m)	Total erro(m)
P2	0,172273	0,0363952	-0,556598	0,583784
P3	-0,154261	0,0183082	0,298503	0,336505
P4	-0,236279	-0,304046	0,580145	0,696304
P5	0,0785225	0,428917	-0,44636	0,623997
P7	0,113805	-0,158187	0,138469	0,239057
Total	0,160262	0,24621	0,43678	0,526384

Pontos (check)	X erro(m)	Y erro(m)	Z erro(m)	Total erro(m)
P1	0,13208	0,568859	-0,284641	0,649666
P6	0,519435	-0,167269	0,281853	0,614193
Total	0,378984	0,419273	0,28325	0,632179

Fonte: O autor (2019).

È possível observar na tabela 13 que a PEC encontrada para esses dados não atende os parâmetros para classificação “A” de qualidade para a escala de 1:1000. Os erros encontrados nesse modelo ficam em torno de 0,5 m, o que prejudicaria o uso dessas informações como uma fonte confiável de dados.

Tabela 13 - Determinação do PEC para o modelo 2018.

Parâmetros	Erro planimétrico total(m)	Erro altimétrico total Z(m)
Média	0,3539	0,0016
Desvio Padrão (DP)	0,1797	0,4309
PEC (1,6449*DP)	0,2956	0,7088

Fonte: O autor (2019).

4.4.3 Modelo 2019

No levantamento realizado em 2019, que buscou avaliar a distribuição dos pontos na cava, foram analisados os três agrupamentos de pontos de maneira independente e em todas as avaliações foi encontrado que a maior parte do erro está associada ao eixo z, em geral maior que 0,05 metros e chegando a erros próximos a 0,5 m em alguns casos, enquanto que o eixo XY apresentou erros sistematicamente bem menores. É importante observar que o ponto p6 e p9, em todos os casos, apresentaram erros significativos. O erro encontrado no ponto p9 pode ser justificado pela pequena quantidade de imagens sobrepostas nos cantos do modelo. Já o erro encontrado no ponto p6 se deve principalmente porque em diversas imagens aéreas o ponto p6 ficou encoberto pela bancada da mina, como ilustra a figura 52, dificultando ou até mesmo impossibilitando a correção dessas imagens.

Figura 52–Ponto encoberto pela bancada (esquerda) e ponto localizado em sua posição correta (direita).



Fonte: O autor (2019).

A tabela 14 apresenta os erros pertinentes à versão 1, apresentando os erros presentes nos pontos de controle e os erros dos demais pontos, utilizados como pontos de checagem. Nessa versão os pontos foram distribuídos buscando a totalidade da superfície levantada, distribuindo os pontos de forma descentralizada. Esse modelo foi o que apresentou maior qualidade em relação aos erros, podendo apenas destacar os erros totais encontrados em p1 e p6. Nesse caso o p9 foi utilizado como ponto de controle o que minimizou um pouco seu erro.

Tabela 14 – Versão 1.

Pontos (controle)	X erro(m)	Y erro(m)	Z erro(m)	Total erro(m)
P5	-0,000996182	0,00166458	-0,00938348	0,0095819
P0	0,00631803	0,00488673	0,00337023	0,00866926
P7	-0,00946709	0,00080000	0,000729267	0,00952879
P9	0,00447802	-0,00573104	0,00556175	0,0091559
Total	0,00613572	0,00387736	0,00571999	0,00924117

Pontos (check)	X erro(m)	Y erro(m)	Z erro(m)	Total erro(m)
P1	-0,0151532	0,00146345	0,13918	0,14001
P4	-0,00852118	0,0086973	-0,0318315	0,0340807
P3	-0,0182403	0,00999004	0,00949488	0,0228618
P2	-0,00215628	-0,00211372	0,00832434	0,00885506
P6	0,0427052	-0,0140882	-0,112305	0,120974
P8	-0,0264367	-0,0386702	-0,00426309	0,0470367
Total	0,0229573	0,017682	0,0743578	0,0798046

Fonte: O autor (2019).

Como o modelo 2019 –Versão 1 apresentou um menor erro, por isso, o mesmo foi submetido a classificação da PEC, se enquadrando na qualidade “A” para uma escala de 1:000, a tabela 15 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 15 - Determinação do PEC para o modelo 2018.

Parâmetros	Erro planimétrico total(m)	Erro altimétrico total Z(m)
Média	0,0170	0,0009
Desvio Padrão (DP)	0,0162	0,0608
PEC (1,6449*DP)	0,0267	0,1000

Fonte: O autor(2019).

Na versão 2 foram escolhidos os pontos próximos ao ponto de base. Na qual foi possível observar um aumento do erro total nos pontos de checagem mais afastados do conjunto de pontos de controle (p9 e p6), como mostra a tabela 16.

Tabela 16 – Versão 2.

Pontos (controle)	X erro(m)	Y erro(m)	Z erro(m)	Total erro(m)
P1	-0,00711809	0,00378294	0,0855664	0,0859453
P2	0,0164752	-0,00568011	-0,0513002	0,0541794
P0	0,00397055	0,0139638	-0,0380586	0,0407334
P8	-0,0134687	-0,0120608	0,00294624	0,018318
Total	0,0113937	0,00983646	0,0534099	0,0554904
Pontos (check)	X erro(m)	Y erro(m)	Z erro(m)	Total erro(m)
P5	0,0485087	-0,0231732	-0,024457	0,0578793
P4	0,0309063	-0,00754005	-0,0723011	0,0789905
P3	0,0108098	0,00023109	-0,0473184	0,048538
P6	0,0794143	-0,0331263	0,0435493	0,0964393
P7	0,0286979	0,00758442	0,0172329	0,034323
P9	-0,0236461	0,00246837	0,467679	0,468282
Total	0,0430397	0,017102	0,195296	0,200712

Fonte: O autor (2019).

Na última versão (tabela 11), os pontos escolhidos estavam no centro do levantamento e possuíam grande número de imagens sobrepostas. Similar ao que ocorreu na versão 2 o erro total dos pontos de checagem mais afastados dos pontos de controle foi superior ao erro total encontrado nos pontos mais próximos. Esse fato é demonstrado pelo erro total do ponto p2 e p6 que é menor que o erro total encontrado nos demais pontos.

Tabela 17 – Versão 3.

Pontos (controle)	X erro(m)	Y erro(m)	Z erro(m)	Total erro(m)
P5	0,000129879	-0,00788828	0,00645003	0,0101904
P4	0,00222256	0,00129797	-0,0247146	0,0248482
P3	0,00236184	0,00537288	0,0158625	0,0169134
P7	-0,00460529	0,00111835	0,00206017	0,00516757
Total	0,00281708	0,00484841	0,0150688	0,0160783
Pontos (check)	X erro(m)	Y erro(m)	Z erro(m)	Total erro(m)
P1	0,0233831	0,00497476	0,165325	0,167044
P2	0,0273053	-0,0029677	0,0215007	0,0348807
P0	0,0544551	0,0114046	0,0355119	0,0660039
P6	0,0206577	0,00464517	0,031961	0,0383383
Pontos (check)	X erro(m)	Y erro(m)	Z erro(m)	Total erro(m)
P8	0,011215	-0,0205403	0,049068	0,0543631
P9	-0,0480588	0,0908568	0,487454	0,498173
Total	0,0344477	0,0384319	0,21217	0,218357

Fonte: O autor (2019).

4.5 DEFINIÇÃO DO APLICATIVO

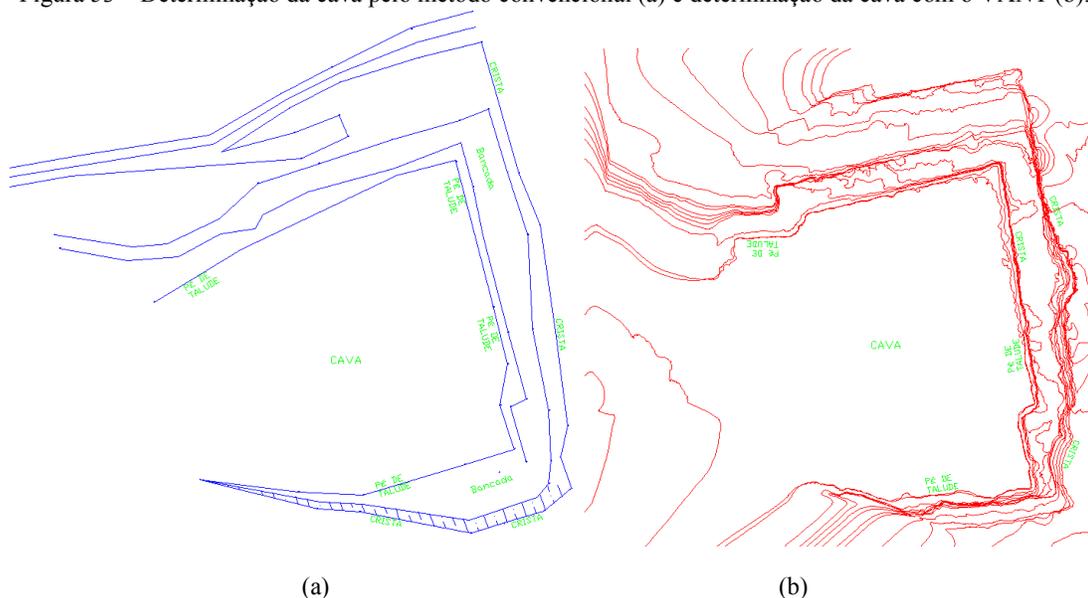
Os dois aplicativos se mostraram capazes de executar as atividades propostas pelo projeto. Entretanto, é possível observar na interface dos dois aplicativos que os mesmos utilizam bancos de dados de imagens de satélites (em formato de KMZ) como base no projeto e planejamento do voo, fato que em diversas situações permitiu constatar que as dimensões da cava nessas imagens não eram compatíveis com a realidade, provocando um plano de voo ineficiente.

Para solução desse problema, de forma geral era necessária uma readequação do plano de voo em campo, e o *Pix4D* mostrou-se bastante versátil nessas adaptações emergenciais, pois não necessitava de conectividade com a rede de *internet*, enquanto o *DroneDeploy* permitia alterações com o aparelho conectado à rede. Essa característica do *Dronedeploy* é um problema na execução de levantamentos, visto que na maioria das áreas de lavra a conexão com a *internet* é limitada. Assim, o *Pix4D* foi selecionado e definido como o aplicativo de planejamento e execução dos voos.

4.6 COMPARAÇÃO ENTRE TOPOGRAFIA CONVENCIONAL E A TOPOGRAFIA COM VANT

Nos resultados dos modelos que visaram definir a cava da Pedreira Esperança foi possível observar que o levantamento com VANT apresentou maior riqueza de detalhes, pois permite observar com precisão o formato da cava, enquanto que o projeto realizado pela topografia tradicional (Estação total) apresentou menos informações, além de possuir um tempo bem maior para execução do trabalho. Para realizar o levantamento de toda a área da cava a aeronave levou cerca de 1 (uma) hora, incluindo tempo de colocação dos pontos de controle em solo e execução da missão de voo, enquanto para executar a mesma tarefa o topógrafo levou cerca de 2 dias para coletar as informações. Na figura 53 está apresentado o resultado das duas metodologias.

Figura 53 – Determinação da cava pelo método convencional (a) e determinação da cava com o VANT (b).



Fonte: O autor (2019).

Apesar do maior nível de detalhamento apresentado, as curvas de nível geradas pelas imagens aéreas não definem de maneira automática o pé e a crista da bancada, sendo necessário um procedimento manual, no Agisoft, para inserir esses contornos específicos, devido ao intervalo entre as curvas de nível. A cava definida pela metodologia tradicional, embora apresente informações confiáveis da cava, é pobre em dados em comparação com as linhas geradas pelo método do modelo digital. De modo geral, a cava obtida através da fotogrametria é melhor na grande maioria das situações, sendo menos eficiente em regiões que dificultem a foto-interpretação como áreas de vegetação muito densa, que dificultam a visualização do terreno. A tabela 18 ilustra essa comparação de forma qualitativa.

Tabela 18 - Comparação entre a topografia convencional e VANT.

Metodologia	Convencional	VANT (modelo digital)
Tempo	16h	2h
Impacto na rotina da mina	Média	Baixa
Representatividade da cava	Média	Alta
Precisão dos resultados	Alta	Alta
Quantidades de informações passível de obtenção	Baixa	Alta

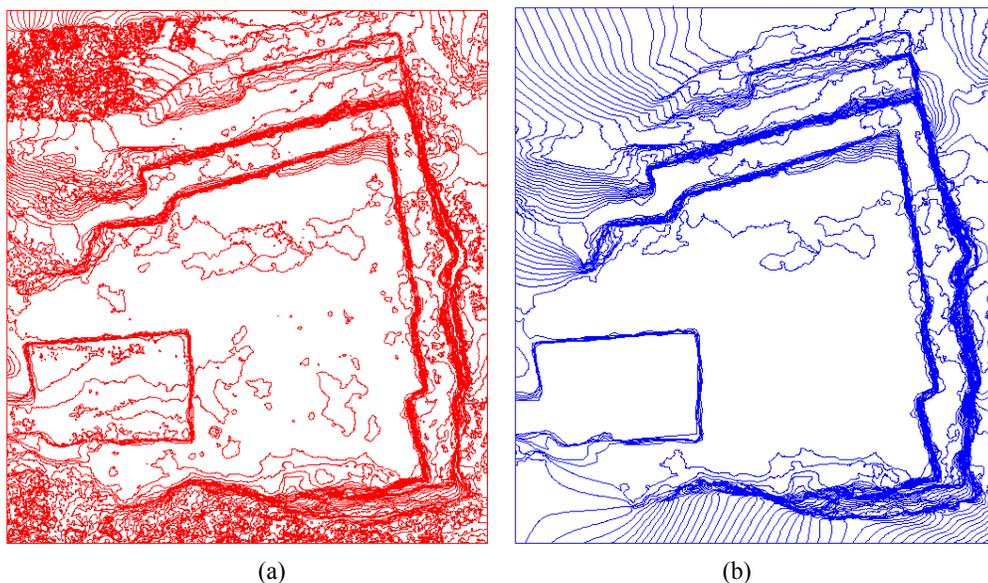
Fonte: O autor (2019).

4.7 CURVAS DE NÍVEL

Foi constatado que a correta definição do intervalo entre as curvas de nível é fundamental para a qualidade do projeto, pois como o modelo tem muitos detalhes, intervalos

estritos apresentaram uma grande quantidade de ruído, enquanto intervalos muito longos causam a perda de informações do terreno, prejudicando a qualidade do projeto. É importante salientar que a definição de ruído está diretamente ligada ao objetivo do modelo e quais são as informações que se pretende extrair, ou seja, o que poderia ser ruído em um projeto pode ser uma fonte de informação indispensável em outro. A representatividade das curvas de nível também está diretamente ligada às etapas anteriores, como a filtragem de elementos indesejáveis, que foi um parâmetro de suma importância para acurácia da topografia estudada. Na figura 54 é possível observar a diferença entre as curvas de nível geradas de maneira trivial para uma gerada a partir de um modelo bem trabalhado, ambas com intervalo de 0,5 m. Alguns contornos apenas puderam ser apagados pelo conhecimento do terreno, possibilitando uma melhor adequação com a realidade na figura 55b.

Figura 54 – Curvas de nível brutas (a) e curvas de nível devidamente trabalhadas (b).



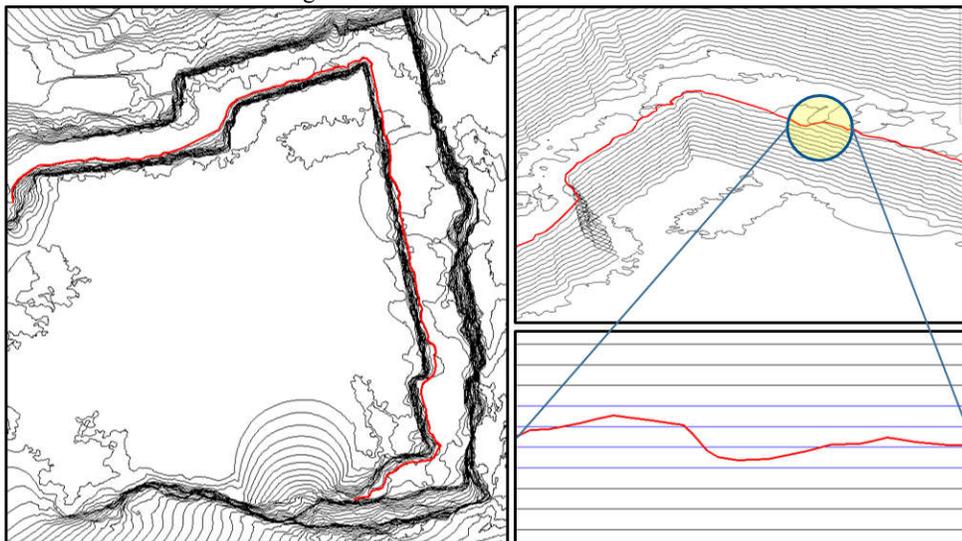
Fonte: O autor (2019).

Como apresentado na figura 54(a), as curvas de nível do modelo bruto não representam o terreno e sim a superfície, além de ser carregado de informações desnecessárias. A grande quantidade de ruído dificulta sua trabalhabilidade em outros *softwares*, pois prolonga o tempo de processamento. A figura 54(b) é mais compatível com o objetivo das curvas de nível, para esse caso, que é representar de maneira clara e definida a cava o MDT.

Uma forma de complementar as curvas de nível é a realização do contorno da crista e pé da bancada no modelo digital produzido no AgisoftPhotoscan, esse procedimento é manual

e sua qualidade depende do operador. Na figura 55 é apresentado o resultado do contorno da crista da bancada no modelo digital de 2017 com intervalo entre curvas de nível de 1 m, não foi contornado o pé da bancada devido a poluição dessa região por blocos desmontados.

Figura 55- Contorno da crista da bancada.



Fonte: O autor (2019).

Na figura é possível perceber que é fundamental a construção do contorno da crista da bancada, pois apenas a curva de nível não é capaz de representar detalhadamente essa informação, visto que a crista não é uniforme e permeia várias curvas de nível.

4.8 COMPARAÇÃO DOS VALORES DO MODELO CORRIGIDO COM O NÃO CORRIGIDO

Na comparação entre os modelos digitais da Pedreira Esperança foi constatado que as medidas lineares ou planas são praticamente iguais, enquanto as medidas volumétricas apresentaram um erro expressivo. Na tabela 19 é possível observar as medidas de comprimento da seção criada, a área do polígono e o volume do polígono em função de um plano XY, escolhido em função da menor altitude dentro da região.

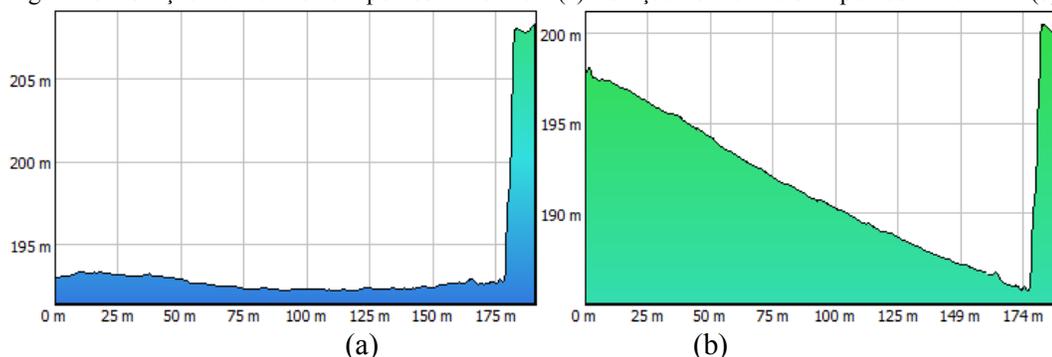
Tabela 19– Comparação entre os modelos.

Dados obtidos	Modelo com PC	Modelo sem PC
Comprimento da seção (m)	190,7	190,2
Área do polígono (m ²)	6908,4	6922,5
Volume do polígono (m ³)	539341 (Z= 185)	464419 (Z= 185)

Fonte: O autor (2019).

Essa diferença significativa no resultado volumétrico pode ser explicada a partir da observação da seção criada, como mostra a figura 56. Nela é possível verificar que sem a retificação do modelo com os pontos de controle, o mesmo apresenta erros consideráveis, o que inviabiliza a obtenção do volume sem prévia correção do modelo.

Figura 56 – Seção do modelo com pontos de controle (a) e seção do modelo sem pontos de controle (b).



Fonte: O autor (2019).

Também foram avaliados os erros encontrados nas coordenadas geográficas, para isso foram escolhidas 4 coordenadas, no caso as vértices do poligonal usada para calcular volume, para ilustrar as diferenças da confiabilidade de uma coordenada obtida de um modelo georreferenciado com pontos de controle e outro não. As tabelas 20 e 21 ilustram os resultados encontrados comparando-os com as coordenadas verdadeiras, obtidas a partir do GPS geodésico.

Tabela 20 – Comparação entre as coordenadas verdadeiras (geodésico) com as do modelo corrigido.

Pontos	Coordenadas Verdadeiras			Modelo Corrigido			Distância(m)
	Coor "X"	Coor "Y"	Coor "Z"	Coor "X"	Coor "Y"	Coor "Z"	
P0	255339,61	9101605,31	193,44	255339,64	9101605,33	193,08	0,361
P6	255526,06	9101645,59	208,73	255526,09	9101645,29	208,42	0,432
P8	255359,17	9101643,19	205,99	255359,16	9101643,14	205,99	0,051
P7	255450,40	9101689,73	207,15	255450,36	9101689,73	207,07	0,089

Fonte: O autor (2019).

Tabela 21 – Comparação entre as coordenadas verdadeiras (geodésico) com as do modelo não corrigido.

Pontos	Coordenadas Verdadeiras			Modelo não Corrigido			Distância(m)
	Coor "X"	Coor "Y"	Coor "Z"	Coor "X"	Coor "Y"	Coor "Z"	
P0	255339,61	9101605,31	193,44	255334,49	9101608,86	197,87	7,645
P6	255526,06	9101645,59	208,73	255521,97	9101641,25	200,42	10,228
P8	255359,17	9101643,19	205,99	255356,27	9101645,65	208,94	4,813
P7	255450,40	9101689,73	207,15	255448,66	9101688,19	203,63	4,218

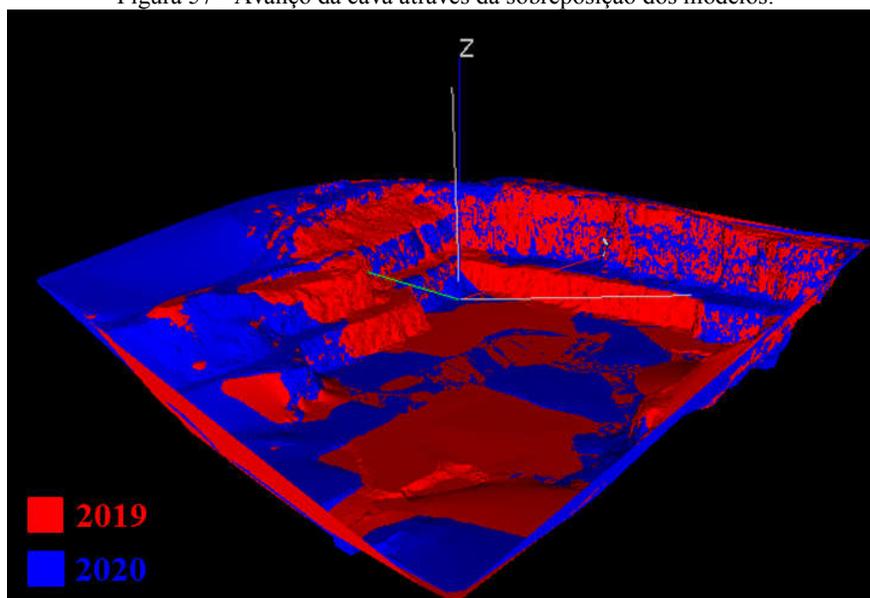
Fonte: O autor (2019).

Nessas tabelas é possível verificar que, enquanto o deslocamento dos pontos com coordenadas verdadeiras para os mesmos pontos no modelo corrigido não ultrapassou metro, esse mesmo deslocamento do ponto no modelo não corrigido chegou a 10 metros. Assim, é perceptível a necessidade da utilização de pontos de controle para a construção de um modelo digital confiável.

4.9 COMPARAÇÃO VOLUMÉTRICA

Após exportação das curvas de nível (0,5 m) do *Agisoft* para o *Studio 3*, foi calculado o volume da cava da Pedreira Esperança a partir dos modelos construídos em 2017 e em 2019, obtendo os valores de 1.238.308 m³ e 1.165.458 m³ respectivamente, utilizando como referência o plano $Z= 189$. A figura 57 ilustra a sobreposição desses modelos e possibilita observar o avanço da lavra durante esse intervalo de tempo.

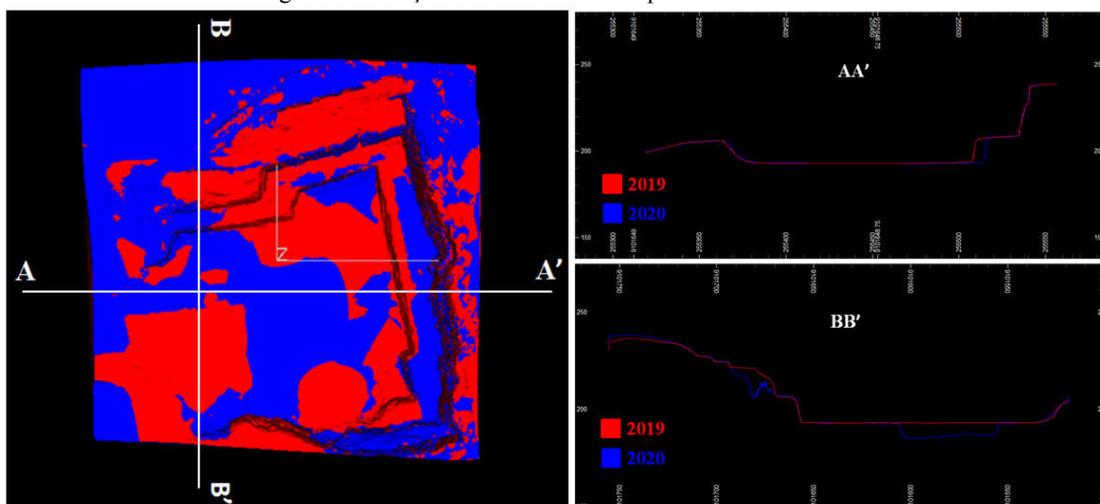
Figura 57 - Avanço da cava através da sobreposição dos modelos.



Fonte: O autor (2019).

A coloração vermelha indica a geometria da cava em 2017 e a azul indica a cava mais recente, a de 2019. É possível observar alguns setores na coloração vermelha, que indica o avanço da cava nesse sentido. Em pontos onde ocorre uma sobreposição indevida do modelo se deve aos erros encontrados, regiões que onde havia vegetação foram aproximadas pelos softwares e movimentação do material pela própria empresa. A figura 58 ilustra melhor essa sobreposição através de secções verticais.

Figura 58 - Seções dos modelos sobrepostos de 2017 e 2019



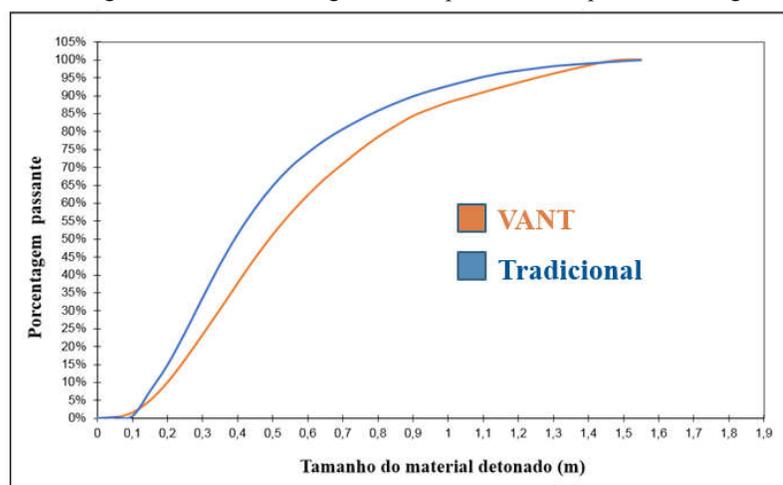
Fonte: O autor (2019)

A diferença volumétrica entre os modelos foi de 58.65 m^3 e o volume de material agregado comercializado pela empresa durante esse período foi de 85.162 m^3 , considerando um empolamento de 1,5, esse parâmetro foi fornecido pela empresa e é utilizado como padrão para os cálculos do material produzido pela mesma. Assim, pode-se determinar uma variação aproximada de 30% entre os valores. Nesse resultado não foi considerado o material que já estava em estoque, ou mesmo o volume de material presente no pátio da mina, que representariam parte significativa dessa variação. Na mina em questão não eram feitos acompanhamentos do estoque, o que impossibilitou a obtenção do valor do estoque antes do levantamento. Entretanto, pode-se afirmar que utilizar essa metodologia para acompanhar o avanço da mina de maneira rotineira pode minimizar os erros associados a estoque e fornecer informações cada vez mais confiáveis.

4.10 RESULTADO DA ANÁLISE DA FRAGMENTAÇÃO

A figura 59 apresenta as curvas granulométricas do setor do desmonte selecionado, sendo possível observar que o resultado da análise granulométrica realizada a partir das imagens obtidas com o VANT é sistematicamente mais grosseira que o resultado mostrado a partir das imagens convencionais. Nessa imagem fica evidente uma intensificação da diferença entre as curvas nas granulometrias no intervalo de tamanho 0,2 m e 1,3 m. Considerando a NBR 6502 (ABNT, 1995), foi calculado o coeficiente de uniformidade da curva granulométrica da metodologia convencional e da metodologia com VANT por meio da relação $C_u = D_{60}/D_{10}$, o qual está apresentado na tabela 22.

Figura 59 – Curva granulométrica da imagem obtida pelo VANT e pela metodologia tradicional.



Fonte: O autor (2019).

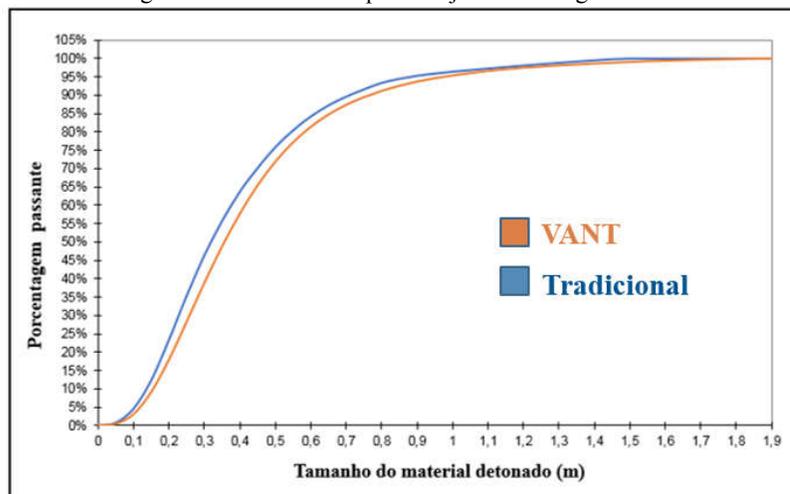
Tabela 22 – Coeficiente de uniformidade (setor).

Dados obtidos	Tradicional	VANT
D60	46,06	57,89
D10	16,36	20,02
Cu	2,73	2,89

Fonte: O autor (2019).

Entretanto, as curvas granulométricas obtidas utilizando o conjunto de imagens aéreas e o conjunto de imagens convencionais apresentaram maior aderência entre elas, como mostra a figura 60. Na tabela 23 são mostradas as informações referentes ao coeficiente de uniformidade das curvas geradas. É provável que parte desse erro esteja ligada à interpretação automática dos blocos pelo *software Split-Desktop*, que por diversas vezes subdivide os blocos grandes em blocos de menor dimensão.

Figura 60 – Curvas granulométrica obtida pelo conjunto de imagens aéreas e convencionais.



Fonte: O autor (2019).

Tabela 23 – Coeficiente de uniformidade (Desmonte completo).

Dados obtidos	Tradicional	VANT
D60	37,61 cm	41,47 cm
D10	13,8 cm	15,66 cm
Cu	2,72	2,65

Fonte: O autor (2019).

As curvas granulométricas obtidas utilizando o conjunto de imagens apresentou um resultado similar entre as curvas, como mostra a tabela 23, que apresenta resultados mais próximos, tanto nos resultados dos diâmetros(D60 e D10) quanto no coeficiente de uniformidade. A maior vantagem do método com tomada de imagens aéreas através do VANT é a rápida captação da imagem e maior representatividade do material desmontado, principalmente pelo fato de a imagem cobrir uma área maior e não haver a necessidade do técnico se arriscar andando sobre as pilhas de material desmontado.

4.11 AVALIAÇÃO DA BANCADA DE DESMONTE

No modelo da bancada gerado é possível perceber os erros pontuais, causados principalmente pela obtenção de caráter manual das imagens. A figura 61 apresenta o modelo digital gerado. Com maior experiência na realização desse levantamento manual, esses erros podem ser minimizados.

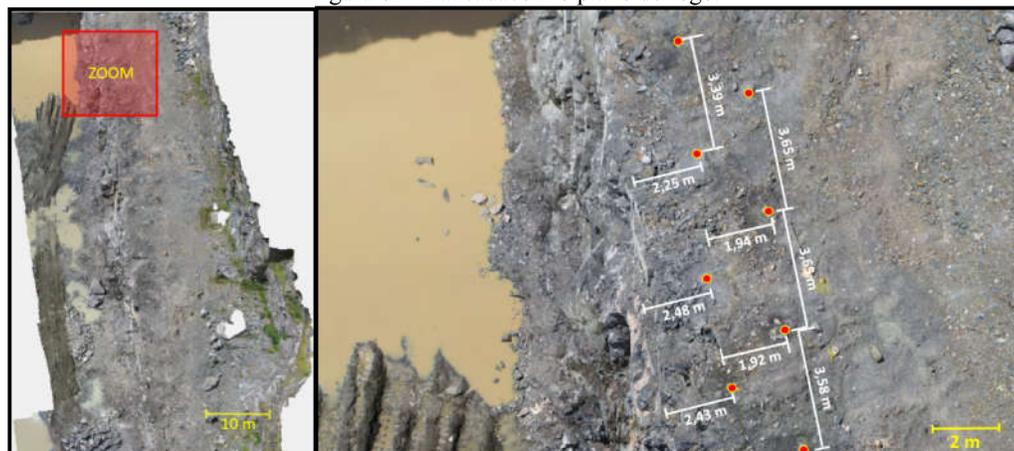
Figura 61 – Modelo digital da bancada.



Fonte: O autor (2019).

A ortoimagem do plano de fogo permite observar a malha de desmorte de forma mais geral, possibilitando extrair informações geométricas do plano de fogo, como afastamento e espaçamento, e verificar a qualidade do plano de fogo. A figura 62 ilustra esse resultado.

Figura 62 –Bancada com o plano de fogo.



Fonte: O autor (2019).

Com relação à tinta spray utilizada, a coloração vermelha se mostrou mais eficiente para localizar os furos, pois se destacava melhor em meio ao maciço rochoso. A figura 63 ilustra essa diferença.

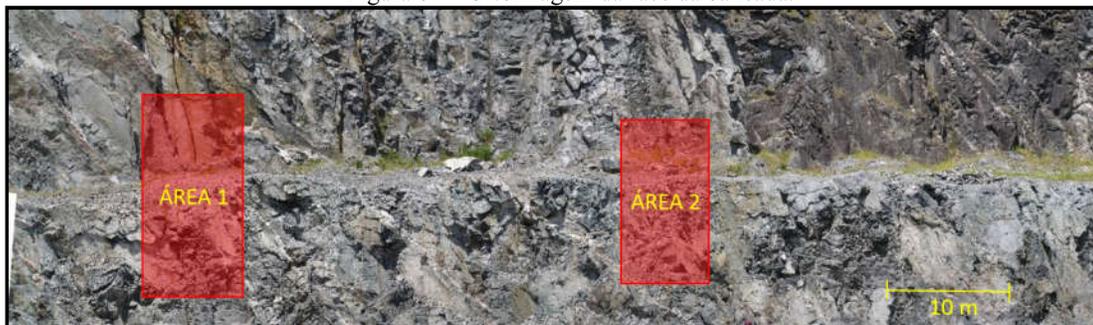
Figura 63 – Pontos do plano de fogo marcados com tinta.



Fonte: O autor (2019).

Ao criar a ortoimagem paralela à bancada foi possível observar a face da bancada e as fraturas presentes. A função de nuvem densa permite acompanhar essa fratura por todo modelo, apesar de possuir menor resolução. A figura 64 ilustra essa imagem paralela à face da bancada e apresenta dois pontos nos quais foi realizado um refinamento.

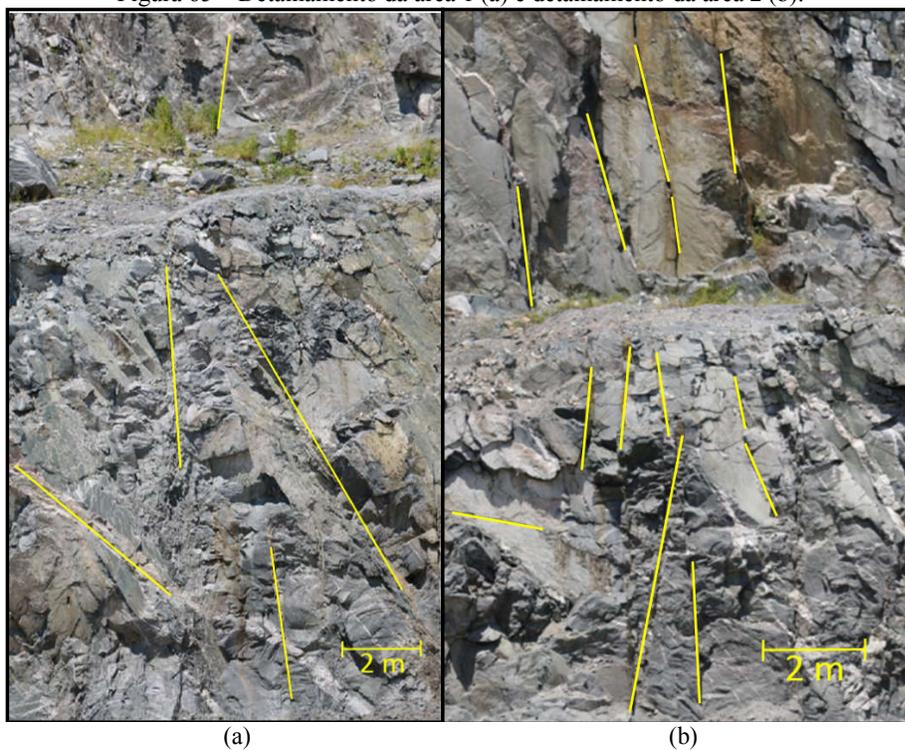
Figura 64 – Ortoimagem da face da bancada.



Fonte: O autor (2019).

A figura 65 apresenta as famílias de fratura presentes nas áreas 1 e 2 da face da bancada. Elas foram destacadas de modo a ilustrar o potencial dessa metodologia, que pode facilitar o trabalho com bancadas de difícil acesso e ultra altas, apresentando um resultado de qualidade satisfatória. Além disso, o uso do modelo digital permite verificar a extensão das fraturas que por diversas vezes se replica em outras localidades, o que as coletas de imagens tradicionais não contemplam.

Figura 65 – Detalhamento da área 1 (a) e detalhamento da área 2 (b).



Fonte: O autor (2019).

5 CONCLUSÕES

O trabalho descreveu e discutiu todas as etapas envolvidas para a construção do Modelo Digital de Superfície e Modelo Digital do Terreno, apresentando os parâmetros e os cuidados que devem ser tomados em cada passo para a construção de um projeto de qualidade. A construção do modelo consiste em levantamento aéreo, alinhar imagens, corrigir imagens por meio de pontos de controle, construção de nuvem densa, construção da malha, criação do modelo de elevação e a ortoimagem. Além de descrever o fundamento e a aplicação da fotogrametria na geração desses produtos.

A comparação entre o levantamento topográfico convencional e o levantamento topográfico executado através de um VANT ilustrou as vantagens do uso desse equipamento aéreo para topografia de uma cava. Embora a topografia executada pelo método tradicional apresente resultados de qualidade principalmente em dados pontuais, é incomparável a qualidade e vantagens dos produtos gerados pelo levantamento aéreo. Podemos destacar o tempo de execução dos dois métodos, no qual o tempo do método com VANT é bem menor que o método tradicional, esse fato se intensifica principalmente em situações de relevo irregular e áreas de grandes dimensões. Além do tempo a existe a possibilidade de executar o levantamento com a mina em plena operação sem prejudicar em nada as operações unitárias. O modelo digital corrigido por pontos de controle seja ele um MDS ou MDT dependendo da necessidade, é uma fonte de informações precisas, chegando a erros planimétrico e altimétrico inferiores a 10 cm, se encaixando na classificação “A” de uma escala de 1:1000 segundo o padrão de exatidão cartográfica nacional. Por fim não menos importante o modelo gerado representa com perfeição todos os aspectos encontrados na cava, tais como acessos, bancadas e taludes, diferente do produto gerado pela metodologia tradicional.

Os modelos digitais permitem a extração de informações geométricas, tais como comprimento, área e volume. As medidas de comprimento e área no modelo corrigido através dos pontos de controle e outro modelo não corrigido foram praticamente iguais e compatíveis com a realidade, apresentando uma diferença inferior a 1%. Entretanto os resultados volumétricos desses modelos foram muito discrepantes. O erro foi associado ao eixo “Z” se intensifica em produtos que não passaram por algum tipo de correção, enquanto a diferença entre os eixos X e Y é bastante inferior. Assim, para obtenção do volume de pilhas e bancadas é imprescindível que o modelo seja retificado por meio de pontos de controle.

Na comparação da análise granulométrica, realizada por meio de imagens aéreas obtidas por VANT e por imagens terrestres obtidas por meio de um técnico sobre a pilha, os

resultados foram positivos. Foram comparados os resultados referentes ao D10, D60 e coeficiente de uniformidade (Cu) das curvas geradas. A diferença do resultado entre o D10 e o D10 variou entre 10 a 20% entre as duas metodologias e a diferença no coeficiente de uniformidade foi inferior a 5%. Nessa comparação foi constatado que o método com VANT apresenta resultados similares aos encontrados pela metodologia tradicional, entretanto é mais facilmente executada e possui maior representatividade do material demonstrado por atuar em uma superfície maior. Os resultados com as imagens áreas apresentaram sistematicamente uma granulometria sutilmente mais grosseira do que o resultado encontrado com as imagens terrestres.

Por fim, foi provada a capacidade do levantamento aéreo com VANT de obter informações confiáveis da mina. Demonstrando ser uma importante ferramenta para o minerador na fase de pesquisa e lavra do empreendimento. Além de ser bastante útil no cumprimento de exigências e documentos afins dos órgãos fiscalizadores, tais como ANM e o órgão ambiental. O trabalho servirá de base para que os mineradores endossem o uso de informações de VANT junto aos órgãos, que atualmente ainda apresentam resistência a essa forma de obtenção de dados. Portanto o uso de VANTs na mineração é um avanço tecnológico sem retorno e deve se tornar um recurso fundamental na mineração. É fundamental mais trabalhos que possam viabilizar essa tecnologia em novas aplicações para aproveitar ao máximo todo seu potencial.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ADA, E. N. J. BILAL, M; KUNLE, G. A. O. R; ALEXANDER, O. A; OKIBE, O; SALU, O. **The international GNSS Monitoring & Assessment Service in a Multi-System environment.** Inside GNSS, New Jersey, USA: 2016 p.40-46. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/312526560_The_International_GNSS_Monitoring_and_Assessment_Service_in_a_Multi-System_Environment>. Acesso em: 13 set. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Cartilha de orientações para usuários de drones.** Brasil: 2017. Disponível em: <http://www.anac.gov.br/assuntos/paginastematicas/drones/orientacoes_para_usuarios.pdf>. Acesso em: 15 ago 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil.** Resolução nº 419, de 2 de maio de 2017 (RBAC-E nº 94). Brasília: ANAC, 2017. Disponível em: <www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94md00/@/@displayile/arquivo_norma/RBACE94EMD00.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2017.

AGISOFT. **AgisoftPhotoscan**: user manual: professional edition, version 1.4. 2018. Disponível em: <https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf>. Acesso em: 18 set. 2019.

AGRA, R. V. **Aplicação do modelo PDCA 90-10 na gestão de ativos de minas a céu aberto.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2014.

AHMED, A. A. M. **Development of an integrated mining and processing optimization system. freiberg, germany:** Faculty of Geosciences, GeoEngineering and Mining of the Technische Universität Bergakademie, 2013. Disponível em: <<http://tubaf.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/11540/Thesis,%20Ayman%20Ahmed.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

ALMEIDA, I. C. **Estudo sobre o uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para mapeamento aéreo com fins de elaboração de projetos viários.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 6., 24-25 de agosto, 2016, Recife. **Anais [...]**. Recife: Decart/UFPE, 2016.

AMARAL, M. **Modelos matemáticos e heurísticas para auxílio ao planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto.** Belo Horizonte: Escola de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

AMARAL, M.; PINTO, L. R. Planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto com alocação de equipamentos de carga e de transporte. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 42, 2010, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: UFSM, 2010. p.1177-1188.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 2003.

BELTRÃO, S. R. D. **Drones na mineração**: a opção mais rápida, segura e barata para sua necessidade. 2017. Disponível em: <<https://www.xd4solutions.com.br/single-post/2017/02/16/Drones-na-minera%C3%A7%C3%A3o-A-op%C3%A7%C3%A3o-maisr%C3%A1pida-segura-e-barata-para-sua-necessidade>>. Acesso em: 05 abr. 2018.

BRASIL. Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 – **Normas Técnicas da Cartografia Nacional**. Diário Oficial da União: Brasília - Brasil, 1984. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/d89817.htm>. Acesso em: 15 fev. 2020.

BRASIL. **Estudo sobre a indústria brasileira e europeia de veículos aéreos não tripulados**: relatório técnico. Brasília: Diálogos Setoriais União Europeia, 2018. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/images/publicacao_DRONES-20161130-20012017-web.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2018.

BULLIVANT, D. Current Surface Mining Techniques. **Journal for the transportation of materials in bulk**: Bulk Solids Handling, v. 7, n. 6, p. 827-833, 1987.

CASACA, J. M; MATOS, J. L; DIAS, J. M. B. **Topografia geral**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

CORREIA NETO, J. M. L. **Avaliação entre a metodologia convencional de modelagem de cavas lavradas em bancadas múltiplas e através do uso de VANTs**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco: Recife, 2016.

DE CARLI, C. **Análise de projetos limite**: lavra a céu aberto x lavra subterrânea. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais: Porto Alegre, 2013.

DJI. **Phantom 4 Advanced / Advanced+**: User Manual. v 1.0. 2017. Disponível em: <<https://images.taqi.com.br/manual/drone-dji-phantom-4-advanced.pdf>>. Acesso em: 08 jun 2019.

EGGER, V. A; FONSECA, F. J; COSTA, A. F. **Desenvolvimento sustentável na mineração**. Venda Nova do Imigrante, Revista científica Intelletto, v. 1, n. 3, p. 27-37, 2016.

EISENBEISS, H. **The Potential of unmanned aerial vehicles for mapping**. In: Photogrammetric week, Stuttgart: Institut fur Photogrammetrie, 2011. p. 135-144.

EMBRATOP. Disponível em: <<http://www.embratop.com.br/produto/topcon-gps-hiper-lite/>>. Acesso em: 20 de set 2019.

EMBRATOP. **Equipamentos novos**. 2019. Disponível em: <<https://www.embratop.com.br/loja/equipamentos-novos>>. Acesso em: 16 set 2019.

ESPARTEL, L. **Curso de topografia**. Porto Alegre: Editora Globo, 1965. 656 p.

FONTES, L. C. A. A. **Fundamentos de aerofotogrametria aplicada à topografia**. Apostila do Curso de Técnicas de Geomensura do Departamento de Transportes da Universidade Federal da Bahia (UFBA), 2005.

GEODEN (Geotecnologias Digitais no Ensino). **Introdução à cartografia**. 2019. s.d. Disponível em: <<http://geoden.uff.br/geodem-introducao/>>. Acesso em: 01 jul 2018.

GOMES, D. Veículos aéreos não tripulados (Vant) na agricultura e meio ambiente. São Paulo, Apta regional, **Pesquisa & tecnologia**, v. 11, n. 2, jul-dez, 2014.

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. **Introductory mining engineering**. 2. ed. Nova Jersey: John Wileyand Sons, 2002.

HORUS. **Aerofotogrametria com drones conceitos básicos**. 2017. Disponível em: <<http://drones.horusaeronaves.com/ebook-aerofotogrametria>>. Acesso em: 12 set 2019.(Ebook distribuído por horus aeronaves Ltda).

HORUS. **Introdução ao uso de VANTs na indústria mineradora**. 2017. Disponível em: <<http://drones.horusaeronaves.com/ebook-drone-mineracao>>. Acesso em: 19 set 2019.(Ebook distribuído por horus aeronaves Ltda).

JORGE, L. A. DE C.; INAMASU, R. Y. **Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão**. In: Bernardi, A. C. de C.; et al. (Eds.). Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar: Brasília, DF- Embrapa, 2014. p. 109-134.

LINDER, W. **Digital Photogrammetry**. Berlin: Springer-Verlag, 2009.

Machado, K. M. C. **Comparação dos fluxos de operação de softwares fotogramétricos de processamento de imagens de VANTS com as etapas de processamentos na fotogrametria digital**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Cartográfica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Unesp, 2008.

PADOLFI, A. S; RAMALDES, G.P; SANTOS O. L. **Análise de índice de vegetação através de imagens obtidas por VANT**. Revista Científica da FAESA, Vitória, ES, v14, n1, p145-165, 2018.

PENNA NETO, S. **Diferenças entre aeronaves remotamente pilotadas de asa fixa e multirotors**. 2017. Disponível em: <<https://www.austertecnologia.com/single-post/2017/05/27/Quais-S%C3%A3o-as-Diferen%C3%A7as-Entre-Aeronaves-Remotamente-Pilotadas-de-Asa-Fixa-e-Multirotors>>. Acesso em: 24 set 2019.

PERONI, R. L. **Aplicações de mapeamento e modelagem de terreno com uso de VANTS em áreas de mineração**. Relatório de Atividades (Pós-Doutorado) – Laboratório de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, Universidade Federal de Santa Catarina, Porto Alegre, 2017.

PIX4D. **Pix4Dmapper 4.1: user manual**. Disponível em: <<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204272989-Offline-Getting-Started-and-Manual-pdf>>. Acesso em: 05 ago 2019.

RASTROS. **Big Data, tractores autónomos y agricultura de precisión para la “revolución digital” del campo**. 2019. Disponível em: <<http://www.rastrosgis.com/es/big-data-tractores-autonomos-y-agricultura-de-precision-para-la-revolucion-digital-del-campo/>>. Acesso em: 20 set 2019.

REDWEIK, P. **Fotogrametria aérea**. Trabalho Acadêmico. Departamento de Engenharia Geográfica e Energia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2007. Disponível em: <<http://snig.igeo.pt/snig-educ/ficheiros/Paula%20Redweik/>> Acesso em: março de 2018.

RIBEIRO, C. **O que é um VANT/Drone?** 2016. Disponível em: <<https://sensix.com.br/2016/03/09/o-que-e-um-vantdrone/>>. Acesso em: 05 jun 2019.

ROCHA, S. S. **Análise comparativa de benefícios econômicos, operacionais e ambientais do método de lavra Terrace Mining na mineração de gipsita do Polo Gesseiro do Araripe**. 2017. Dissertação (Mestrado Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017.

SACHS, P. F. T. **Cadeia de valor mineral e tecnologia da informação: alinhamento estratégico como gerador de eficácia em empresas de mineração**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

SCHWUCHOW, U. H. **Cálculo de volume em mineração com levantamentos fotogramétricos (VANT) e Geodésico (GNSS)**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Cartográfica) – Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SEBRAE. **Gestão de processos**. Minas Gerais. 2017. Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/ufs/mg/noticias/gestao-de-processos,7a7f0d40b715c510VgnVCM1000004c00210aRCRD>>. Acesso em: 05 abr. 2018.

SILVA NETO, M. Pontos de controle: quando utilizar no mapeamento aéreo com drone? DronEng, **Drone& Engenharia**, 2009. Disponível em: <<http://blog.droneng.com.br/pontos-de-controle-quando-utilizar-no-mapeamento-aereo-com-drone-2/>>. Acesso em: 15 set. 2019.

SILVA, D. C. et al. Qualidade de ortomosaicos de imagens de vant processados com os softwares APS, PIX4D E PHOTOSCAN. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO. Recife, 2014. **Anais [...]**. Recife: Decart/UFPE, 2014.

TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria básica**. São Paulo: UNESP, 2009.

US ARMY. **Photogrammetric Mapping– EM 1110-1-1000 – Engineer Manual (Series Engineering and Design)**. Washington DC, Estados Unidos: U.S. Army Corps of Engineers, 2002.

ZANARDI, R. P. Análise da qualidade dos modelos digitais de terreno e de superfície do município de Porto Alegre. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA. 26., 2006. Gramado, RS. **Anais [...]**. Disponível em :<http://www.cartografia.org.br/cbc/trabalhos/4/190/CT045_1404439404.pdf>. Acesso em : 23 de março de 2020.