



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

JOSÉ ADRIANO DA SILVA

**AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS EM TOPOGRAFIA: CONTROLE
ESTATÍSTICO DE PROCESSOS NA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE DADOS
OBTIDOS**

FORTALEZA

2018

JOSÉ ADRIANO DA SILVA

AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS EM TOPOGRAFIA: CONTROLE
ESTATÍSTICO DE PROCESSOS NA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE DADOS
OBTIDOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Orientador: Prof. Dr. Adunias dos Santos
Texeira.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S58a Silva, José Adriano da.
Aeronaves remotamente pilotadas em topografia: Controle estatístico de processos na avaliação da qualidade de dados obtidos / José Adriano da Silva. – 2018.
88 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira.
1. Aeronave Remotamente Pilotada. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Processamento de Imagens. 4. Nuvem de Pontos. 5. Controle de Qualidade. I. Título.

CDD 630

JOSÉ ADRIANO DA SILVA

AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS EM TOPOGRAFIA: CONTROLE
ESTATÍSTICO DE PROCESSOS NA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE DADOS
OBTIDOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. PhD. Adunias dos Santos Teixeira Ph.D. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luis Clenio Jário Moreira
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia – Limoeiro do Norte (IFCE)

Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Thiers
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Daniel Albiero
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Antônio e Fátima e toda a
família.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à Deus, por ter me dado força durante todo meu percurso de discente.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Ao Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira, pela orientação nesse trabalho, amizade e por todos os ensinamentos que ficarão e guiarão muitos dos meus passos profissionais e como cidadão.

Aos Doutores Luis Clenio Jário Moreira, Daniel Albiero e Paulo Roberto Lopes Thiers, membros da banca de avaliação pelas contribuições para o melhoramento da Dissertação.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (UFC).

Aos meus pais Antônio e Fátima, e meus irmãos Hamiltom, Auriana, Conceição, Cícera, Nilda e Maria, bem como minha namorada Elia, pelo apoio incondicional.

Aos familiares em geral e aos colegas e amigos pelo apoio, auxílio e amizade em todas as horas.

Ao Grupo CADIC Brasil S/A, pelo apoio na disponibilização de equipamentos e materiais que forma parte desse trabalho.

À GTA Levantamentos e ao Grupo Transitar Engenharia, pelo apoio na disponibilização de equipamentos, materiais e equipe técnica em parte desse trabalho.

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade.”

Albert Einstein

RESUMO

Embora os avanços em relação à fotogrametria atual com uso de RPA's (Aeronaves Remotamente Pilotadas) possam oferecer grandes vantagens em termos de custos, abordagem intuitiva e eficaz para modelagem 3D, pouco se sabe sobre sua qualidade. Tendo como foco a análise da qualidade, foram desenvolvidos dois projetos em que, no primeiro, o objetivo foi analisar os erros do processo envolvendo o uso do sistema RTK (*Real Time Kinematic*) na coleta de pontos de GCPs e avaliar qualidade apresentada em processo de aferição de volume de minério através do uso de RPA's, considerando duas alturas de vôos e dois níveis de sobreposição, e, no segundo, o objetivo foi fazer enquadramento no PEC, através de análise entre MDE obtido por dados SRTM, dados de GPS e MDE obtido por meio do uso de RPA para área com presença de dunas e vegetação. Ambos os projetos foram desenvolvidos dentro ou no entorno do Complexo Industrial e Portuário do Pecém-CE. O RPA utilizado foi o Inspire 1, tendo a bordo a câmera ZENMUZE X3, de 12 MP, distância focal de 3,6 mm, largura 4.000 pixels, altura 3.000 pixels, largura do sensor 6,17 mm e altura do sensor 4,628 mm. Tanto os erros horizontais e verticais relacionados ao modelo de RTK, como os erros relacionados ao ajuste de coordenadas Este, Norte e Elevação dos GCP's para os vôos a 70 e 120 metros de altura ficaram dentro dos limites de controle. Embora a variação na altura de voo e na sobreposição lateral não tenha produzido efeitos negativos sobre o ajuste em relação aos GCP's, houve variações nos resultados de volumes, com efeitos negativos maiores sobre pilhas de dimensões menores. Os dados SRTM apresentaram erros médios de 3,70m, 5,26m e 3,52m em relação aos dados de GPS, MDE obtido por meio de RPA para área com vegetação e MDE obtido por meio de RPA para área de dunas móveis, respectivamente. O MDE obtido por meio do uso de RPA apresentou melhor qualidade em termos enquadramento no PEC, quando comparado com dados SRTM. O melhor enquadramento que o SRTM apresentou em relação ao PEC para classe A foi para escala 1:10.000, sendo que, na escala de 1:1.000, o referido MDE pode ser classificado na classe C. Além disso, pelas análises realizadas, foi possível identificar movimentação de dunas entre os períodos da passagem do SRTM e a coleta de informações com GPS e RPA, indicando potencialidade da integração dessas tecnologias para o monitoramento de áreas costeiras.

Palavras-chave: aeronave remotamente pilotada; sensoriamento remoto; processamento de imagens; nuvem de pontos; controle de qualidade.

ABSTRACT

Although advances in current photogrammetry using RPA's (Remotely Piloted Aircraft) can offer great cost advantages, an intuitive and effective approach to 3D modeling, little is known about its quality. The main objective of this study was to analyze the errors of the process involving the use of the RTK (Real Time Kinematic) system in the collection of GCP points and to evaluate the quality presented in the process of in order to evaluate the volume of ore through the use of RPA's, considering two flight heights and two overlapping levels, and in the second, the objective was to frame the PEC, through analysis between MDE obtained by SRTM data, GPS data and MDE obtained through the use of RPA for an area with presence of dunes and vegetation. Both projects were developed in or around the Pecém-CE Industrial and Port Complex. The RPA used was the Inspire 1, having on board the camera ZENMUZE X3, 12 MP, focal length of 3.6 mm, width 4000 pixels, height 3,000 pixels, width of the sensor 6.17 mm and height of the sensor 4,628 mm. Both the horizontal and vertical errors related to the RTK model, as well as the errors related to the adjustment of coordinates East, North and Elevation of GCPs for flights at 70 and 120 meters in height were within the control limits. Although variations in flight height and lateral overlap did not have any negative effects on the adjustment to GCPs, there were variations in volume results, with larger negative effects on piles of smaller dimensions. The SRTM data presented mean errors of 3.70m, 5.26m and 3.52m in relation to GPS data, MDE obtained by means of RPA for vegetation area and MDE obtained by RPA for mobile dune area, respectively. The MDE obtained through the use of RPA presented better quality in terms of framing in the PEC when compared to SRTM data. The best framework that the SRTM presented in relation to the PEC for class A was for 1: 10,000 scale, and in the 1: 1,000 scale the said MDE could be classified in class C. In addition, through the analyzes, it was possible to identify dune movement between the SRTM passage periods and the information collection with GPS and RPA, indicating the potential of the integration of these technologies for the monitoring of coastal areas.

Keywords: remotely piloted aircraft; remote sensing; image processing; cloud of points; quality control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de Drone utilizado no levantamento (Modelo Inspire 1, Dji).....	24
Figura 2 - Ilustração dos planos de vôos a 70 metros (A) e a 120 metros (B).....	24
Figura 3 - Detalhe da Base Geodésica e coleta dos pontos de controle (GCPs)	25
Figura 4 - Detalhe da estrutura de concreto com as medias reais colhidas com trena de aço	26
Figura 5 - Detalhe gráfico da definição de uma célula para cálculo de volume pelo Pix4DMapper	27
Figura 6 - Fluxograma da metodologia empregada no processo aquisição de imagens com uso de RPA's e geração de nuvem de pontos 3D.....	31
Figura 7 - Mosaico da área do pátio de carvão mineral com distribuição dos pontos de GCPs.....	32
Figura 8 - Teste de normalidade para precisões horizontais (A) e verticais (B) dados pelo sistema RTK para os 13 (treze) GCP's analisados.....	34
Figura 9 - Histograma das precisões horizontais (HA) e verticais (HV) dadas para os GCPs pelo RTK	35
Figura 10 - Cartas de controle para precisões horizontais (A) e verticais (B) dadas pelo sistema RTK. (HA - Precisões horizontais; HV - Precisões verticais).....	35
Figura 11 - Histograma (A) e cartas de controle para o Fator R (Range) para as direções Leste (B), Norte (C) e Elevação (D)	38
Figura 12 - Teste de normalidade para erros de GCP's nas coordenadas Leste, Norte e Elevação, para os voos a 70 (A) e 120 metros de altura (B).....	40
Figura 13 - Histograma (A) e cartas de controle para os erros dados em relatório pelo Pix4D para os GCPs para as coordenadas Leste (B), Norte (C) e Elevação (D) para o vôo a 70 metros de altura.....	42
Figura 14 - Histograma (A) e cartas de controle para os erros dados em relatório pelo Pix4D para os GCPs para as coordenadas Leste (B), Norte (C) e Elevação (D) para o vôo a 120 metros.....	43

Figura 15 - Vista em perspectiva com detalhe da nuvem de pontos 3D em plataforma Pix4DMapper a 70 (A) e 120 (B) metros em mesma região da área mapeada.....	44
Figura 16 - Detalhe de nuvem de pontos 3D em plataforma Pix4D Mapper a 70 (A) e 120 (B) metros, em mesma região da área mapeada	45
Figura 17 - Detalhe em perspectiva da estrutura de concreto usada como referência no processo de cálculo de volume no próprio Pix4D para os voos a 70 metros (A) e 120 metros (B), e detalhe do bloco de concreto desenhado em plataforma CAD Civil 3D (C)	45
Figura 18 - Representação da distribuição espacial das pilhas de carvão mineral no pátio da UTE (Usina Termoelétrica da Pecém), bem como do bloco de concreto usado como referência no processo de comparação entre volumes para voos conduzidos a 70 e a 120 metros de altura.....	48
Figura 19 - Detalhe da localização espacial do traçado da área de estudado.....	58
Figura 20 - Detalhe da localização espacial do trabalho e configuração geral dos planos de voos para traçado mapeado com levantamento aerofotogramétrico com uso de RPA.....	60
Figura 21 - Detalhe ilustrativo da Base Geodésica (A) e coleta dos GCPs (B).....	61
Figura 22 - Ortofoto do traçado com a distribuição espacial dos pontos de GPS para todo o traçado, distribuição dos pontos analisados para área de dunas praia (SRTM x MDE RPA/ÁREA DE DUNAS), com vegetação (SRTM x MDE RPA/ÁREA VEGETADA) e o perfil do alinhamento central.....	66
Figura 23 - Perfis gerados a partir de dados de MDE SRTM e MDE obtido por aerolevantamento com uso de RPA.....	69
Figura 24 - Representação gráfica em separado dos modelos de textura, MDS e MDT para os dados produzidos a partir de levantamento aerofotogramétrico com uso de RPA da área de estudo.....	71
Figura 25 - Mapa de declividade em percentagem para dados SRTM (A) e MDE gerado a partir do uso de RPA (B).....	72

Figura 26 - Histograma para as variáveis que analisam a diferença em altimetria entre dados de SRTM e GCPs (SRTM x GCPs), SRTM e área de dunas (SRTM x MDE RPA/ÁREA DE DUNAS), SRTM e área vegetada (SRTM x MDE RPA/ÁREA VEGETADA) e as diferenças entre de MDE produzido por RPR e dados de GPS (MDE RPA x GPS)..... 73

Figura 27 - Cartas de controles para diferença entre dados SRTM e dados de GPS (SRTM x GCPs) (A), SRTM e área de dunas (SRTM x MDE RPA/ÁREA DE DUNAS) (B), SRTM e área vegetada (SRTM x MDE RPA/ÁREA VEGETADA) (C) e diferenças entre MDE produzido por dados de RPA e dados de GPS..... 74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Erros horizontais e verticais médias dado pelo sistema RTK para cada ponto de controle (GCPs).....	33
Tabela 2	- Dados amostrais para as coordenadas Este, Norte e Elevação, colhidos para fins de estudo de reprodutividade do operador do sistema RTK	36
Tabela 3	- Dados médios para as coordenadas Este, Norte e Elevação, bem como fator R para as respectivas direções, colhidos para fins de estudo de reprodutividade do operador do sistema RTK	37
Tabela 4	- Diferença de localização por GCP entre as coordenadas obtidas com GPS RTK e as coordenadas calculadas no processamento das imagens, para o mesmo ponto, nas três direções de coordenadas (Leste, Norte e Elevação), para os vôos a 70 e 120 metros.....	39
Tabela 5	- Resumo do quadro da ANOVA com valores de F_c e P_r para erros atribuídos à GCP's na fase de processamento de imagens de RPA's, considerando duas alturas de voo (70 e 120 metros de altura).....	40
Tabela 6	- Médias dos fatores altura e erros nas direções (coordenadas) dos vetores para as duas alturas voos (70 e 120 metros de altura)	41
Tabela 7	- Valores de volumes para o bloco de concreto, tido como referência, cálculos pelo Pix4D Mapper e o volume real obtido em plataforma CAD Civil 3D, bem como desvio padrão dos dados dado pelo Pix4D para cada altura de voo.....	46
Tabela 8	- Resultados de volume, desvio padrão e diferenças produzidas para pilhas de carvão mineral em processo de aferição de volumes através de uso de RPA e processamento digital de imagens, considerando alturas de voos de 70 e 120 metros de altura	49
Tabela 9	- Enquadramento no PEC e dados estatísticos para diferenças entre SRTM e dados de GPS (SRTM x GCPs), SRMT e MDE obtido por RPA para área maior aporte de vegetação (SRTM x MDE RPA/ÁREA VEGETADA) e área de com dunas (SRTM x MDE RPA/ÁREA DE DUNAS) e MDE produzido por RPA e dados de GPS (MDE RPA x GPS).....	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Padrão de exatidão cartográfica altimétrica dos pontos cotados e do MDT (Modelo Digital do Terreno), MDE (Modelo Digital de Elevação) ou MDS (Modelo Digital de Superfície) para produção de dados cartográficos digitais	64
--	----

ISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SIGs	Sistemas de Informações Geográficas
SR	Sensoriamento Remoto
VANTs	Veículos Aéreos Não Tripulados
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfico
3D	Tridimensional
SfM	Estrutura do Movimento
GSD	Distância de Amostragem em Terra
GCP	Pontos de Controle de Solo
GNSS	Sistema de Navegação Global por Satélites
GPS	Sistema de Posicionamento Global
REM	Radiação Eletromagnética
RTK	Real Time Kinematic
CEP	Controle Estatístico de Processo
SCN	Sistema Cartográfico Nacional
LSC	Limite Superior de Controle
LIC	Limite Inferior de Controle
MDE	Modelo Digital de Elevação
SRTM	Shuttle Radar Topographic Mission
EMQ	Erro Médio Quadrático
SCN	Sistema Cartográfico Nacional
EP	Erro Padrão
RPA	Aeronaves Remotamente Pilotadas
INDE	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais

LISTA DE SÍMBOLOS

S_w	Largura do sensor (mm)
Im_w	Largura da imagem (pixel)
Fr	Distância focal (mm)
H	Altura de vôo (m)
V_i	Volume individual de cada célula
L_i	Comprimento da célula
W_i	Largura da célula
H_i	Altura da célula
Z_{Ti}	Altitude do terreno de cada célula no centro da célula
Z_{Bi}	Altitude base de cada célula no centro da célula
\bar{R}	Range Médio
R	Range
\bar{X}	Média
S	Desvio padrão amostral
σ	Desvio padrão
n	Número de Observações

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	14
1.1	Hipóteses	17
1.2	Objetivos	17
1.2.1	<i>Gerais</i>	17
1.2.2	<i>Específicos</i>	17
2	CAPÍTULO I- ANÁLISE DE QUALIDADE NA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE AFERIÇÃO DE VOLUME DE MINÉRIO POR MEIO DA APLICAÇÃO DE RPA	20
2.1	INTRODUÇÃO	21
2.2	MATERIAL E MÉTODOS	23
2.2.1	<i>Localização da Área de Estudo</i>	23
2.2.2	<i>Planejamento e Execução das Missões</i>	23
2.2.3	<i>Implantação e Coleta dos GCP's</i>	25
2.2.4	<i>Coleta de Medidas de Estruturas/Controle</i>	26
2.2.5	<i>Processamento dos Dados</i>	26
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
2.3.1	<i>Análise da coleta de dados em sistema RTK</i>	32
2.3.1.1	<i>Análise de precisões do sistema RTK</i>	33
2.3.1.2	<i>Análise da capacidade do operador do sistema RTK</i>	35
2.3.2	<i>Análise de processamento de dados em função dos GCP's</i>	39
2.3.2.1	<i>Cartas de Controle para voo a 70 metros</i>	41
2.3.2.2	<i>Cartas de Controle para voo a 120 metros</i>	42
2.3.3	<i>Análise comparativa de volumes</i>	44
2.4	CONCLUSÕES	50
3	CAPÍTULO II- COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE ELEVAÇÃO OBTIDOS POR DADOS SRTM E DADOS GERADOS POR MAPEAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO COM USO DE RPA PARA ÁREA COM PRESENÇA DE VEGETAÇÃO E DUNAS NO LITORAL CEARENSE	54
3.1	INTRODUÇÃO	55

3.2	MATERIAL E MÉTODOS	58
3.2.1	<i>Localização da Área de Estudo</i>	58
3.2.2	<i>Dados de MDE do SRTM</i>	59
3.2.3	<i>Levantamento Aerofotogramétrico com uso de RPA</i>	59
3.2.4	<i>Coleta de Pontos de Controle de Solo (GCP's)</i>	61
3.2.5	<i>Processamento e análise dos dados</i>	62
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
3.3.1	<i>Enquadramento segundo Padrão de Exatidão Cartográfica</i>	65
3.3.2	<i>Análise Comparativa de Perfis</i>	69
3.3.3	<i>Cartas de Controle para Variações na Altimetria</i>	73
3.4	CONCLUSÕES	77
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
	REFERÊNCIAS.....	81
	ANEXO A - FATORES PARA CONSTRUÇÃO DE GRÁFICOS DE	
	CONTROLE PARA VARIÁVEIS	85
	APÊNDICE A - LISTA DE COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS	
	MÉDIAS PARA OS 13 (TREZE) GCP'S	86

1 INTRODUÇÃO GERAL

Dados e técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) têm sido progressivamente aplicados em diversos campos do conhecimento e, associado aos SIGs (Sistemas de Informações Geográficas), estabeleceram-se como ferramentas indispensáveis para diversas áreas do conhecimento. Termo cunhado no início dos anos de 1960 e definido como a arte e a ciência de obter informações sobre objetos, sem que haja contato físico direto com o objeto (JENSEN, 2007), o SR é uma das mais bem-sucedidas tecnologias de coleta automática de dados para o levantamento e monitoração dos recursos terrestres em escala global e local.

Com o rápido desenvolvimento da geoinformática potencializada nos últimos anos, culminando com possibilidade de diminuição do tamanho e peso dos sensores, o surgimento de novas e importantes soluções como os RPA's, bem como inúmeros e consideráveis avanços nos aplicativos de processamento de imagens, as potencialidades no campo do SR vêm sendo continuamente ampliadas (CERBARO, 2016).

Nesse contexto, o imageamento com uso de RPA's (Aeronaves Remotamente Pilotadas) é um dos campos de estudos que se desenvolve mais rapidamente dentro das tecnologias de SR, oferecendo uma opção de baixo custo que permite mensurar e monitorar os alvos sob diversos aspectos, com a possibilidade de aquisição das imagens sob condições ambientais adversas, como por exemplo, sob momentos com alta cobertura de nuvens, com resolução espacial e temporal controladas pela necessidade do usuário (HONKAVAARA *et al.*, 2013).

É importante, antes de qualquer coisa, esclarecer que RPA's é o termo correto para designar Aeronaves Remotamente Pilotadas, termo esse que caracteriza o conjunto de todos os elementos envolvidos no voo de uma RPA. Em outras palavras, nos referimos ao RPA's quando citamos não só a aeronave envolvida, mas todos os recursos do sistema que a fazem voar: a estação de pilotagem remota, o link ou enlace de comando e controle que possibilita a pilotagem da aeronave, seus equipamentos de apoio, etc. Drone (em português: zangão, zumbido) é um apelido informal, originado nos EUA, que vem se difundindo, mundo a fora, para caracterizar todo e qualquer objeto voador não tripulado, seja ele de qualquer propósito (profissional, recreativo, militar, comercial, etc.), origem ou característica. Há ainda o termo VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), que é uma terminologia oficial prevista pelos órgãos reguladores brasileiros. Porém, neste trabalho será dada a designação de RPA ou RPA's nas

discussões ou quando se referir ao equipamento e acessórios que permitiram a condução dos levantamentos aerofotogramétricos de campo.

Sistemas de imageamento baseados em RPA's são bastante competitivos em aplicações locais, quando são necessárias repetitivas coletas de imagens, uma vez que características relacionadas à parâmetros das imagens como resoluções, escalas e tipos de sensores, podem ser escolhidos de acordo com a necessidade de cada trabalho (MORGAN et al., 2010). Atualmente, as aplicações não militares são para diversas finalidades, como por exemplo: fotogrametria, monitoramento de reservas ambientais, do clima, no jornalismo, fazer entregas rápidas, e muitas outras (NASCIMENTO, 2014).

De acordo com relatório de estudo sobre a indústria brasileira e europeia de veículos aéreos não tripulados (BRASIL, 2017), que traz um diálogo setorial União Europeia-Brasil com estudo sobre a indústria brasileira e europeia de veículos aéreos não tripulados, as principais aplicações comerciais dos RPA's estão na infraestrutura (monitoramento de investimento, manutenção, inventário de ativo), transporte (entrega de encomendas, peças de reposição, logística médica, entrega de alimentos), seguros (monitoramento de risco, avaliação de risco, gestão de sinistros e prevenção de fraudes), mídia e entretenimento (fotografia e filmagem aéreas, publicidade, espetáculos e efeitos especiais), telecomunicações (aprimoramento da manutenção, planejamento de investimentos e otimização de rede, transmissão de sinais de telecomunicações), agricultura (supervisão da safra, análises de solo e de campo, avaliação da saúde, pulverização da lavoura), segurança (monitoramento de fronteiras e locais, reação pró-ativa), mineração (planejamento, exploração, meio ambiente, monitoramento), além de atividades humanitárias (vigilância em áreas de conflito, resposta a desastres, censo de florestas e vida selvagem, monitoramento em desativação de minas terrestres).

Nas Engenharias em geral, os RPA's vêm sendo utilizado na inspeção de barragens e plataformas de petróleo, gasodutos, inspeção de fachadas com termal, (NASCIMENTO, 2014), BIM e as built (DEUS, 2017), aplicações na indústria naval (KNEIPP, 2018), monitoramento das lavouras para identificação de pragas e doenças, deficiências nutricionais, déficit hídrico, previsão de safras, monitoramento da erosão do solo (REIDELSTUERZ *et al.*, 2007), cadastro florestal (BRAZ *et al.*, 2015), monitoramento da vegetação (SUGIURA *et al.*, 2005), aferição de volume de minério (SILVA *et al.*, 2017), entre outros. Segundo Nascimento (2014), no Brasil, o principal destaque está na agricultura, com utilizações para verificação de irrigação de plantações, aplicação de fertilizantes e até mesmo no controle de formação de formigueiros em plantações de eucaliptos.

Tomando como base a comparação com outros sensores disponíveis no mercado atual, os RPA's se destacam devido à sua resolução espacial, oferecendo liberdade ao operador do equipamento para a obtenção de imagens em diferentes momentos, facilidade no desenvolvimento de planos de voos, além da grande possibilidade de se estruturar uma base com imagens multitemporais. Além dos benefícios já citados, a plataforma também permite agilidade, qualidade e baixo custo aos usuários (BRAZ *et al.* 2017).

A capacidade dos RPA's em alcançar locais de difícil acesso e em perspectivas diferenciadas, com possibilidade de voo autônomo e com velocidade controlada, alto nível de precisão para coletas de imagens digitais, formaram um novo e importante mercado (DEUS, 2017). Porém, muito do sucesso dos RPA's no mercado de aquisição de imagens está nos avanços recentes na tecnologia computacional, desenvolvimento de software, materiais mais leves, sistemas globais de navegação e a sofisticação e miniaturização dos sensores (SIMÕES *et al.*, 2015).

Nesse contexto, o desenvolvimento em campo de visão computacional tem sido utilizado para resolver problemas específicos da área, como medição de posicionamento relativo (ALCOFORADO; FERNANDES, 2016) e visão cooperativa para construção de mapas únicos a partir de imagens capturadas por vários RPA's (MERINO *et al.*, 2006).

Diversos softwares de processamento digital de imagens de RPA's, comerciais e livres, estão disponíveis. Pix4D mapper, APS Menci, Correlator3D e Agisoft Photoscan são exemplos dos mais difundidos no momento. Nesses softwares, todo o processamento, desde a orientação interna, correspondências automáticas entre todas as imagens que tenham alguma sobreposição, ajustamento simultâneo de feixes em bloco e geração dos produtos, como MDS, MDT e ortomosaico, entre outros, são realizados de forma autônoma.

Contudo, considerando a evolução dos softwares que fazem o processamento digital de imagens e geração de produtos de forma automática, torna-se necessário conhecer a qualidade com que tais algoritmos chegam a esses produtos, para que seja possível o enquadramento dos resultados técnicos dos produtos de RPA's em projetos de levantamentos topográficos de forma segura (REMONDINO *et al.*, 2016). De uma forma geral, no Brasil, quando se trata de análises de qualidade direcionada para produtos cartográficos têm sido com base a aplicação do Padrão de Exatidão Cartográfico (PEC), definido pelo Decreto 89.817 de 20 de Julho de 1984, que incluem o cálculo do erro médio quadrático (EMQ) e da tolerância vertical (MICELI *et al.*, 2011). Porém, quando se trata de qualidade de produtos topográficos, principalmente àqueles obtidos por técnicas novas, como por meio do uso de RPA's e processamento digital dessas imagens, é possível que simplesmente a aplicação do PEC não

forneça subsidio suficiente para traduzir a qualidade desses dados, tornando necessário à aplicação de novas técnicas que possa auxiliar no melhor entendimento desses processos.

1.1 Hipóteses

- a) O uso de RPA's para aplicações em mapeamentos com foco em levantamentos de dados para suporte a projetos técnicos apresentam bom enquadramento segundo PEC; e
- b) O processamento de imagens e geração de nuvens de pontos e produtos técnicos a partir de dados primários obtidos por RPA's constitui método sob controle de processo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Gerais

O objetivo geral desse trabalho é analisar a metodologia e a qualidade técnica de produtos de sensoriamento remoto, obtidos por meio de uso de RPA, e produzidos por técnicas de geoprocessamento, com foco em aplicações topográficas.

1.2.2 Específicos

Como objetivos específicos, podem ser citados:

- Avaliar a qualidade do processo na aplicação do método de coleta de pontos topográficos por sistema RTK (*Real Time Kinematic*), bem como a influência dos erros do operador;
- Analisar a qualidade de processo para ajuste de GCP's em processamento digital de imagens de RPA;
- Avaliar a influência da altura de voo e sobreposição de imagens nos resultados finais de dados técnicos gerados por RPA;
- Analisar a qualidade de produtos cartográficos obtidos por meio de levantamento aerofotogramétrico com uso de RPA e fazer o enquadramento segundo o PEC.

REFERÊNCIAS

- ALCOFORADO, M. S; FERNANDES, B. T. Aplicação de Algoritmos de Visão Computacional para UVAs em Missões de Busca. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v.2, n.1, p.315-322, 2016.
- BRAZ, A M; BORGES, J. P. S; BERNARDES, D. C. S; TEREZAN, L. H. Análise da aplicação de VANT na atualização de cadastro florestal com uso de pontos de controle. In: **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**. João Pessoa-PB, Brasil: Anais, 2015. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2015/06.15.15.10.43/doc/p0545.pdf>. Acesso em: 02 Jun. 2018.
- BRASIL, RELATÓRIO. **Estudo Sobre a Indústria Brasileira e Europeia de Veículos Aéreos Não Tripulados**. Projeto Apoio aos Diálogos Setoriais União Europeia – Brasil, 2017. Disponível em: http://www.mdic.gov.br/images/publicacao_DRONES-20161130-20012017-web.pdf. Acesso em: 03 Jun. 2018.
- CERBARO, V. A. C. **Drone: uma plataforma para coleta, armazenamento e disponibilização de dados agrícolas**. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2016. 91 f.
- DEUS, B.R. B. S. **Mapeamento 3D com drone para suporte ao BIM aplicado a arquitetura**. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2017. 82 f
- HONKAVAARA, E; SAARI H; KAIVOSOJA, J; POLONEN, I; HAKALA T; LITKEY, P; MAKYNEN J; PESONEN L. Processing and assessment of Spectrometric, Stereoscopic Imagery Collected Using a Lightweight UAV Spectral Camera for Precision Agriculture. **Remote Sensing**, v. 5, p. 5006-5039, 2013.
- JENSEN JR. **Remote sensing of the environment: an Earth Resources Perspective**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2007. 592p.
- KNEIPP, R. B. **O estado da arte na utilização de drones para inspeção naval e offshore**. Monografia. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2018. 87 f.
- MERINO, L; WILKLUND, J; CABALLERO, F; MOE, A; DIOS, J; FORSSÉN, P. E; NORDBERG, K; OLLERO, A. Vision-Based Multi-UAV Position Estimation. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, p. 53-62, 2006.
- MORGAN, J.L; GERGEL, S.E; COOPS, N.C. Aerial photography: a rapidly evolving tool for ecological management. **BioScience**, v. 60, n.1, p. 47-59, 2010.
- MICELI, B. S; DIAS, F.M; SEABRA, F. M.; SANTOS. P. R. A; FERNANDES, M. C. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63, n.1, 2011.
- NASCIMENTO, M. L. M. **Utilização de drone e termografia na detecção de**

manifestações patológicas em edificações. Brasília: Universidade Católica de Brasília, 2014. 26 f.

NIEDERHEISER, R; MOKROS, M; LANGE, J; PETSCHKO, H; PRASICEK, G; ELBERINK, S. O. Deriving 3d point clouds from terrestrial photographs - comparison of different sensors and software. In: **XXIII ISPRS Congress - The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.** Prague, Czech Republic: Anais, 2016. Disponível em: <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLI-B5/685/2016/isprs-archives-XLI-B5-685-2016.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2016.

REMONDINO, F; SPERA, M.G; NOCERINO, E; MENNA, F; NEX, F. State of the art in high density image matching. In: **The Photogrammetric Record 29, [S.I]:** 2014. p. 144–166. Disponível em: http://3dom.fbk.eu/sites/3dom.fbk.eu/files/pdf/Remondino_et al_PhotoRecord29-146.pdf. Acesso em: 25 out. 2016.

REMONDINO, F; BARAZZETTI, L; NEX, F; SCAIONI, M; SARAZZI, D. Uav photogrammetry for mapping and 3d modeling—current status and future perspectives. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. [S.I],** v. 38, n.1, p.22, 2011.

REIDELSTUERZ, P; LINK, J; GRAEFF, S; CLAUPEIN, W. Uav (unmanned aerial vehicles) für Präzisionslandwirtschaft. 1, In: **Bornimer Agrartechnische Berichte -13 Workshop Computer Bildanalyse in der Landwirtschaft & Workshop Precision Farming. [S.I]:** Anais, 2007. p.75-84. Disponível em: <https://www.uni-hohenheim.de/en/organization/publication/uav-unmanned-aerial-vehicles-fuer-praezisionslandwirtschaft>. Acesso em: 20 out. 2016.

SILVA, J. A; CALOU, V. B. C; TEIXEIRA, A. S; ALBIERO, D. Controle estatístico de processo aplicado à GCP's em mapeamento aerofotogramétrico com uso de vant. In: **XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR.** Santos - SP, Brasil: Anais, 2017. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/marte2/2017/10.27.15.33>. Acesso em: 20 jun. 2018.

SIMÕES, I. D. G; MIRANDA, C. G; SOUZA, C. H. W; SANCHES, G. M; PICOLI, M. C. A. Avaliação do desempenho de classificadores em imagens de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). In: **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR,** João Pessoa-PB, Brasil: Anais, 2015.

SUGIURA, R; NOGUCHI, N; ISHII, K. Remote-sensing Technology for Vegetation Monitoring using an Unmanned Helicopter. **Biosystems Engineering. [S.I],** v. 90, n. 4, p.369–379, 2005.

2 CAPÍTULO I - Análise de qualidade na aplicação do método de aferição de volume de minério por meio da aplicação de RPA

RESUMO: O objetivo desse trabalho foi analisar os erros do processo envolvendo o uso do sistema RTK (*Real Time Kinematic*) na coleta de pontos de GCPs, bem como avaliar qualidade apresentada em processo de aferição de volume de minério através de levantamento aerofotogramétrico com uso de RPA's, para duas alturas de vôos e dois níveis de sobreposição, em pátio de deposição minério no Complexo Industrial e Portuário do Pecém-CE. Foram realizados vôos a 70 e 120 metros de altura, com sobreposição frontal calculada de 85% e lateral de 80% para o vôo a 70 metros e sobreposição frontal de 85% e lateral de 60% para o vôo a 120 metros, usando um RPA Inspire 1 tendo a bordo a câmera ZENMUZE X3, de 12 MP, distância focal de 3,6 mm, largura 4.000 pixels, altura 3.000 pixels, largura do sensor 6,17 mm e altura do sensor 4,628 mm. Foram coletados 13 pontos de controles (GCPs) usando um GPS Geodésico RTK e colhido as medidas de uma estrutura de concreto com trena de aço para fins de aferição do método. O processamento das imagens de RPA's e geração da nuvem de pontos, bem como o cálculo de volumes e geração do ortomosaico foi feito usando o software Pix4D Mapper Pro. Tanto os erros horizontais e verticais relacionados ao modelo de RTK e ao operador, bem como os erros relacionados ao ajuste de coordenadas Este, Norte e Elevação dos GCPs para os vôos a 70 e 120 metros de altura ficaram dentro dos limites de controle, indicando, portanto, que nesse caso o processo encontra-se sob controle. As alturas de vôo a 70 e a 120 metros de altura, bem como a variação na sobreposição, não interferiram de forma negativa no ajuste dos erros dos GCP's na etapa de processamento dos dados pelo software Pix4DMapper. Embora a variação na altura de voo e na sobreposição lateral não tenha produzido efeitos negativos sobre o ajuste em relação aos GCP's, houve variações nos resultados de volumes, com efeitos negativos maiores sobre pilhas de dimensões menores. A diminuição na sobreposição para o voo a 120 metros de altura produziu dados quantitativos de volumes que apresentaram tendências a serem menores.

Palavras-chave: Controle estatístico de processo. Aerofotogrametria. GCP's. aferição de volume.

2.1 INTRODUÇÃO

Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA's) têm sido cada vez mais aplicados, e nos mais diferentes contextos (ALCOFORADO; FERNANDES, 2016). Popularmente conhecidos como VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) ou Drones, sua utilização em aplicações civis vem crescendo rapidamente em diversas áreas e com inúmeras finalidades. Dentre essas áreas destacam-se aplicações orientadas para monitoramento e gestão dos recursos naturais (HORCHER & VISSER, 2004), monitoramento da vegetação (SUGIURA *et al.*, 2005), agricultura de precisão (REIDELSTUERZ *et al.*, 2007), mapeamento de sítios arqueológicos (BENDEA *et al.*, 2007; PATIAS *et al.*, 2007), mineração e fiscalização (ROCK *et al.*, 2011), segurança e meio ambiente (ROIG *et al.*, 2013), inspeção de edifícios (NASCIMENTO, 2014), mineração (SILVA *et al.*, 2017), BIM e As Built (DEUS, 2017), cartografia (REMONDINO *et al.*, 2011) e diversas outras áreas.

As RPA's vêm ganhando espaço nos segmentos diversos devido a sua agilidade na tomada de imagens, proporcionando resultados praticamente em tempo real para os usuários (BRAZ *et al.*, 2017). Sua ampla utilização deve-se a facilidade de adaptação às necessidades de cada projeto, pois as características das imagens estão diretamente relacionadas a parâmetros como resoluções, escalas e tipos de sensores, que são escolhidos de acordo com a necessidade de cada trabalho, além de permitirem a coleta de dados com alta resolução espacial e temporal (ROCK *et al.*, 2011).

Segundo Simões *et al.* (2015), o sucesso das RPA's no processo de aquisição de imagens está relacionado com os avanços recentes na tecnologia computacional, engenharia de software, melhorias da qualidade dos sistemas globais de navegação e a sofisticação e miniaturização dos sensores, possibilitadas pelas nanotecnologias.

Nesse contexto, diversos softwares de processamento digital de imagens de RPA estão disponíveis no mercado. O Pix4D mapper é um exemplo de um dos mais difundidos no momento. Nesse software, todo o processamento, desde a orientação interna, correspondências automáticas entre todas as imagens que tenham alguma sobreposição mínima, ajustamento simultâneo de feixes em bloco e geração dos produtos, como MDS, nuvem de pontos 3D, modelo de textura e ortomosaico, entre outros, são realizados automaticamente (OIKONOMOU *et al.*, 2015; Pix4D, 2016).

A metodologia utilizada para derivar nuvens densas de pontos 3D e modelos MDSs a partir de imagens obtidas por câmeras embarcadas em RPA geralmente está baseada no algoritmo como SfM (*structure from motion*), que usa abordagem combinada para

encontrar padrões de correspondência nas imagens (REMONDINO *et al.*, 2014). Ainda segundo Remondino *et al.* (2014), nuvens de pontos e Modelos Digitais de Superfícies (MDSs) derivados a partir do uso de RPA e processadas usando algoritmos como SfM podem ser comparados à nuvem densa de pontos obtidas por laser scanning, com relação a qualidade e resolução alcançada.

Contudo, embora os avanços em relação à fotogrametria atual possam oferecer grandes vantagens em termos de custos (quando comparado com as formas convencionais de levantamento aerofotogramétrico), abordagem intuitiva e eficaz para mosaicagem e modelagem 3D, usando muitas plataformas de softwares disponíveis, pouco se sabe sobre qual sensor e qual o software irá produzir resultados que possam atender de forma eficaz aos requisitos dos usuários (NIEDERHEISER *et al.*, 2016).

O desenvolvimento de algoritmos nessa linha foi sempre acompanhado de avaliação de seu desempenho em termos de precisão. Ultimamente, as investigações de precisão têm sido realizadas sobre a geração de modelos digitais de superfície (REMONDINO *et al.*, 2016) e, quando se deseja obter bons resultados métricos em termos de precisão para projetos que usam imagens digitais, torna-se necessário o uso de pontos de controle (GCPs) (REMONDINO *et al.*, 2008). Aqui, os pontos de controle são uma importante fonte de dados para correção geométrica (BARRY; COAKLEY, 2013; REMONDINO *et al.*, 2016)

Esses GCP's têm a finalidade de apoiar o processamento dos dados adquiridos por VANT's, oferecendo aumento da precisão para as imagens, através da correção geométrica, além de serem uma importante fonte de análise quando se buscar observar a qualidade de produtos gerados por RPA's (BRAZ *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2017).

Alguns fatores afetam a qualidade do modelos de dados produzidos com imagens coletadas com RPA's, como por exemplo, textura homogênea, falhas de recobrimento das linhas de vôo devido à ação de ventos geram imagens muito oblíquas, entre outros (SILVA *et al.*, 2015). Nesse contexto, torna-se necessário que se conheça onde estão as fontes de erros para que a aplicação da técnica seja usada de forma eficiente nos mais diversos empregos.

Geralmente, os produtos cartográficos são analisados em função do PEC-PCD – Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos da Cartografia Digital (CONCAR, 2011). Contudo, dentro do universo da análise de qualidade, o Controle Estatístico de Processos (CEP) compreende um conjunto de técnicas estatísticas que são usados para monitorar e melhorar os processos. Campo da Engenharia da qualidade, dedica-se ao monitoramento da variação inerente dos processos, denominada de variação natural, com o objetivo de distingui-

las das causas especiais, que em geral são identificáveis. Nesse contexto, faz-se uma importante ferramenta de análise de qualidade em qualquer processo (MONTGOMERY, 2004).

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi analisar os erros do processo envolvendo o uso do sistema RTK (*Real Time Kinematic*) na coleta de pontos de GCPs, bem como avaliar qualidade apresentada em processo de aferição de volume de minério através de levantamento aerofotogramétrico com uso de RPA's, para duas alturas de vôos e dois níveis de sobreposição, em pátio de deposição minério no Complexo Industrial e Portuário do Pecém-CE.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Localização da Área de Estudo

O trabalho foi conduzido no Complexo Industrial e Portuário do Pecém-CIPP, mais especificamente, no pátio de deposição de Carvão Mineral da Unidade Termoelétrica-UTE, localizado na Rodovia CE 085, Km 40,5, município de São Gonçalo do Amarante-CE, em junho de 2016. As coordenadas de localização da entrada da usina são: Latitude 3°35'4,05"S e Longitude 38°52'18,74"O.

2.2.2 Planejamento e Execução das Missões

Foram realizados vôos a 70 e 120 metros de altura, com RPA Inspire 1 (Figura 1), Drone da marca Dji, tendo a bordo a câmera ZENMUZE X3, de 12 MP, distância focal de 3,6 mm, largura 4.000 pixels, altura 3.000 pixels, largura do sensor 6,17 mm e altura do sensor 4,628 mm.

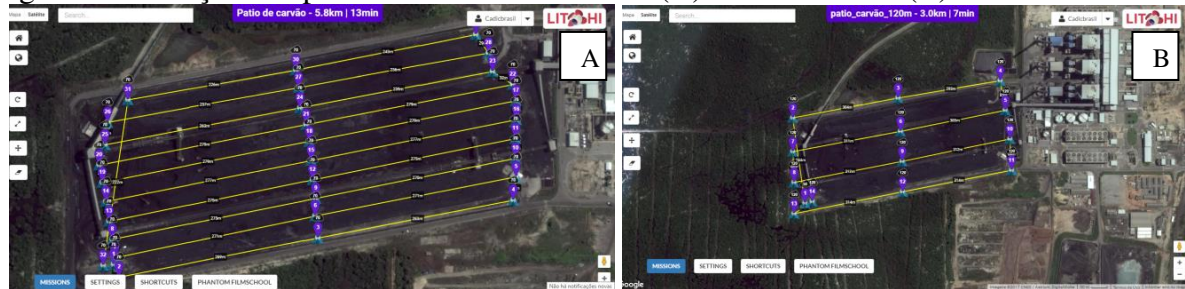
Figura 1. Modelo de RPA utilizado no levantamento (Modelo Inspire 1, Dji).



Fonte: Autor (2018).

Os voos foram conduzidos usando o aplicativo para voo programado Litchi (Figura 2). A velocidade programada para o voo foi de 28 km/h (7,778m/s), com uma taxa de armazenamento de imagens a cada 2 segundos. A área mapeada foi de 540m x 220m, com sobreposição frontal calculada de 85% e lateral de 80% para o voo a 70 metros e sobreposição frontal de 85% e lateral de 60% para o voo a 120 metros, produzindo, portanto, 10 linhas de voo para o primeiro e 4 para o segundo, com um total de 310 imagens capturadas e usadas no processamento para o voo a 70 metros e 153 para o voo a 120 metros.

Figura 2. Ilustração dos planos de vôos a 70 metros (A) e a 120 metros (B).



Fonte: Autor (2018).

O tempo total estimado para o voo pela plataforma Litchi foi de 13 e 7 minutos para os vôos a 70 e 120 metros de altura, respectivamente. O GSD, do inglês *Ground Sampling Distance* (cm/pixel) foi calculado pela seguinte expressão (Pix4D, 2016):

$$\text{GSD (cm/pixel)} = \frac{Sw * H * 100}{Imw * Fr} \quad (2.1)$$

Em que:

S_w é a largura do sensor (mm);

Imw é a largura da imagem (pixel);

Fr é a distância focal (mm); e

H a altura de vôo (m).

2.2.3 Implantação e Coleta dos GCP's

Foram coletados 13 pontos de controles (GCPs), aleatoriamente distribuídos, usando um GPS Geodésico RTK da marca TRIMBLE, modelo R4, com Base instalada em um marco geodésico anteriormente implantado, usando o mesmo equipamento (Figura 3). Cada coordenada foi colhida com 3 (três) repetições, onde foi instalado e retirado o modulo ROVER em cada repetição de coleta de GCP, com o objetivo de colher informações passível de análise da qualidade do processo de aquisição, bem como do operador do equipamento.

O conjunto RTK faz a determinação das coordenadas planialtimétricas através do rastreo de satélites pertencentes ao sistema Navstar-GPS, com a utilização do Receptor base GNSS com 72 canais paralelos e nova tecnologia R-Track para rastreamento dos sinais L1/CA e L2, com suporte para WASS e EGNOS, GLONASS L1/CA e L2, rádio base UHF TRIMBLE HPB450, com 14 canais selecionáveis e Receptor Rover GNSS com antena e rádio UHF integrados em uma única peça, com 72 canais paralelos e tecnologia R-Track para rastreamento dos sinais L1/CA e L2 com suporte para WASS e EGNOS, GLONASS L1/CA e L2 e Coletor de dados Trimble TSC2 (TRIMBLE, 2013).

Figura 3. Detalhe da Base Geodésica e coleta dos pontos de controle (GCPs).



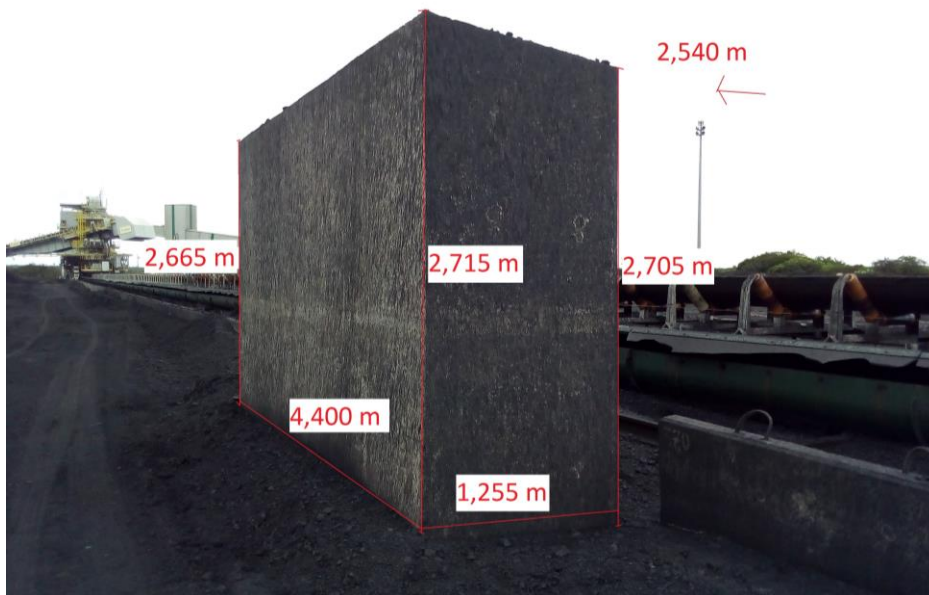
Fonte: Autor (2018).

Além do sistema RTK de alta precisão, com $3\text{ mm} + 0.1\text{ ppm RMS}$ na horizontal e $3,5\text{ mm} + 0,4\text{ ppm RMS}$ na vertical (TRIMBLE, 2013), para diminuir os erros da etapa manual do processo, que é a inserção dos GCPs na etapa de processamento, foram usadas placas de acrílico medindo $0,30\text{m} \times 0,30\text{m}$ de cor laranja, com um centro marcado em cruz com fita medindo $1,7\text{ cm}$ de largura (Figura 3B e 3C). O projeto foi desenvolvido tendo como base o Datum Horizontal SIRGAS2000, com cotas geométricas e usando o plano de projeção UTM (*Universal Transversa de Mercator*).

2.2.4 Coleta de Medidas de Estruturas/Controle

Com a finalidade de obter dados de estruturas com medidas reais, para fins de aferição e controle do método, foi coletado amostra de uma estrutura/controle, com medidas aferidas em campo com trena de aço. A Figura 4 mostra as medidas reais de uma estrutura de concreto que faz parte do complexo do pátio de deposição de carvão, com suas respectivas dimensões.

Figura 4. Detalhe da estrutura de concreto com as medias reais colhidas com trena de aço.



Fonte: Autor (2018).

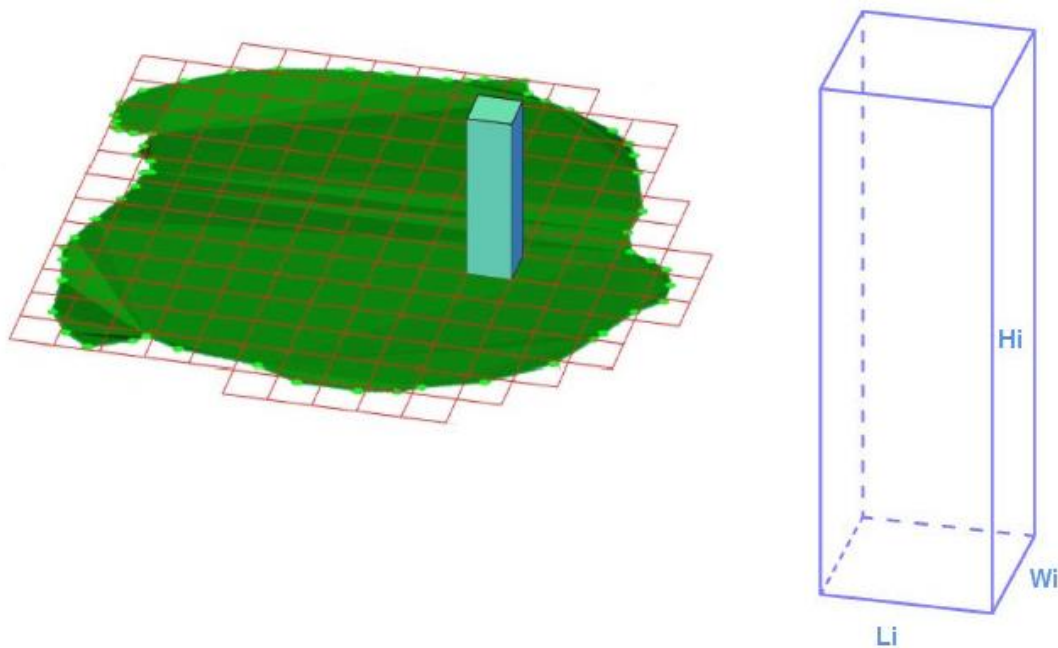
2.2.5 Processamento dos Dados

O processamento das imagens de RPA's e geração da nuvem de pontos, bem como o cálculo de volumes e geração do ortomosaico foi feito usando o software Pix4D Mapper Pro, com licença pertencente à Empresa GTA Levantamentos. Esse software, por ter uma

interface bastante amigável e apresentar bons resultados em termos de qualidade indicada por vários trabalhos na linha, sendo hoje, umas das principais plataformas usadas no processamento digital de imagens adquiridas com RPA's em todo o mundo.

O Pix4D faz a estimativa de volume usando o método de comparação de superfícies, no qual gera uma superfície inferior, ou grade, com tamanho de células igual ao tamanho do GSD, levando em conta cada vértice desenhado sobre a nuvem de pontos ou a partir de uma cota adotada como referência (Pix4Dapper, 2018).

Figura 5. Detalhe gráfico da definição de uma célula para cálculo de volume pelo Pix4DMapper.



Fonte: Pix4DMapper (2018).

Segundo a Pix4DMapper (2018), para cada célula i da grade, seu volume (V_i) é dado por:

$$V_i = L_i * W_i * H_i \quad (2.2)$$

Onde:

L_i = o comprimento da célula.

W_i = a largura da célula.

H_i = a altura da célula.

O Comprimento (L_i) e Largura (W_i) são iguais ao GSD do projeto.

$$L_i = W_i = GSD \quad (2.3)$$

A Altura (H_i) é dada por:

$$H_i = Z_{Ti} - Z_{Bi} \quad (2.4)$$

Onde:

Z_{Ti} = a altitude do terreno de cada célula no centro da célula.

Z_{Bi} = a altitude base de cada célula no centro da célula.

Portanto, o volume V_i da célula i é dado por:

$$V_i = GSD * GSD * (Z_{Ti} - Z_{Bi}) \quad (2.5)$$

O volume acima da superfície de base, ou volume de corte (V_c) como define o software, é o volume entre a base e o terreno 3D, quando o terreno é mais alto que a base, e é dado por:

$$\text{Volume de corte} = V_c = V_{c1} + V_{c2} + \dots V_{cN} \quad (2.6)$$

Onde:

N = Volume de corte da célula $i \dots N$

A confecção de gráficos e das cartas de controle se deu usando o software Minitab 16. O Minitab faz a determinação gráfica das cartas de controle e cálculos básicos segundo a seguinte rotina:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.7)$$

Onde:

\bar{x} = Média;

n = Número de Observações.

O desvio padrão amostral é dado pela expressão:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.8)$$

Onde:

S =Desvio Padrão Amostral;

Segundo Montgomery (2004), outra forma de obter o desvio padrão por estimativa é com base no Range e valor d_2 tabelado é dado pela seguinte expressão:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (2.9)$$

Onde:

$\hat{\sigma}$ = Desvio Padrão estimado;

\bar{R} = Range médio; e

d_2 = Valor tabelado (ver no Apêndice A).

O Range é dado pela seguinte fórmula:

$$R = \max(x_i) - \min(x_i) = x_{\max} - x_{\min} \quad (2.10)$$

Ainda Segundo Montgomery (2004), quando são empregadas variáveis quantitativas contínuas no controle estatístico de processo, é necessário controlar/monitorar tanto o valor médio quanto a variabilidade do processo e nesses casos o controle da média do processo é realizado por meio da carta de controle para médias (X) ou por meio da carta de controle para valores individuais (I), quando não houver medidas replicadas dentro dos subgrupos. Assim, quando for possível especificar valores padrão ou de referência para a média e desvio padrão do processo, pode-se usar tais valores para construir os gráficos X e R sem recorrer à análise de dados históricos, como representa esse caso.

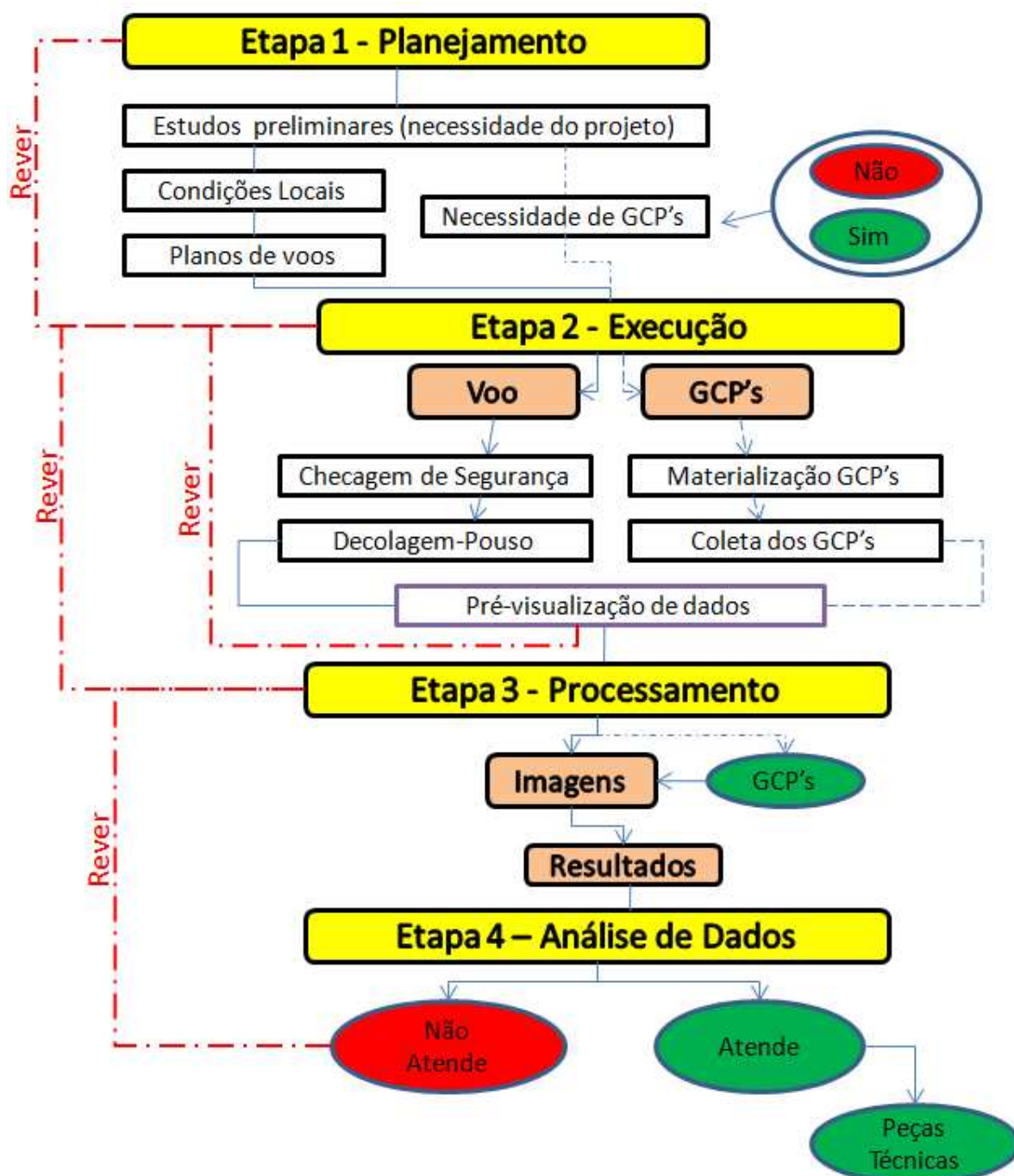
Supondo-se que esses valores de referência sejam μ (média) e σ (desvio padrão), então, os limites de controle do gráfico serão calculados de acordo com as Equações 2.11.

$$\begin{aligned}
LSC &= \mu + 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \\
LC &= \mu \\
LIC &= \mu - 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}
\end{aligned}
\tag{2.11}$$

Vale salientar que o uso de cartas de controle na avaliação do processo que envolve a qualidade de dados adquiridos por meio de RPA's não é comum. Porém, como o método de análise de dados usando a técnica da carta de controle é universal, eficiente e aplicável a qualquer processo, optou-se por incluí-la na análise.

A metodologia utilizada para aquisição e processamento dos dados obtidos pelo RPA, está dividida em 4 etapas, que são: (1) Etapa de planejamento; (2) Etapa de execução; e (3) Etapa de processamento; e (4) Etapa de análise de dados. A Figura 6 ilustradas no fluxograma do processo.

Figura 6. Fluxograma da metodologia empregada no processo aquisição de imagens com uso de RPA's e geração de nuvem de pontos 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise estatística comparando os erros atribuídos aos GCP's para as duas alturas estudadas foi feita em tratamento fatorial, usando o software SISVAR. Os mapas e croquis de apresentação foram feitos utilizando o software ArcMap 9.1, ambos com licenças pertencentes ao LEMA (Laboratório de Eletrônica e Máquinas Agrícolas) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará. O cálculo do volume da estrutura de concreto usada como testemunho ou controle absoluto foi conduzido usando a versão de

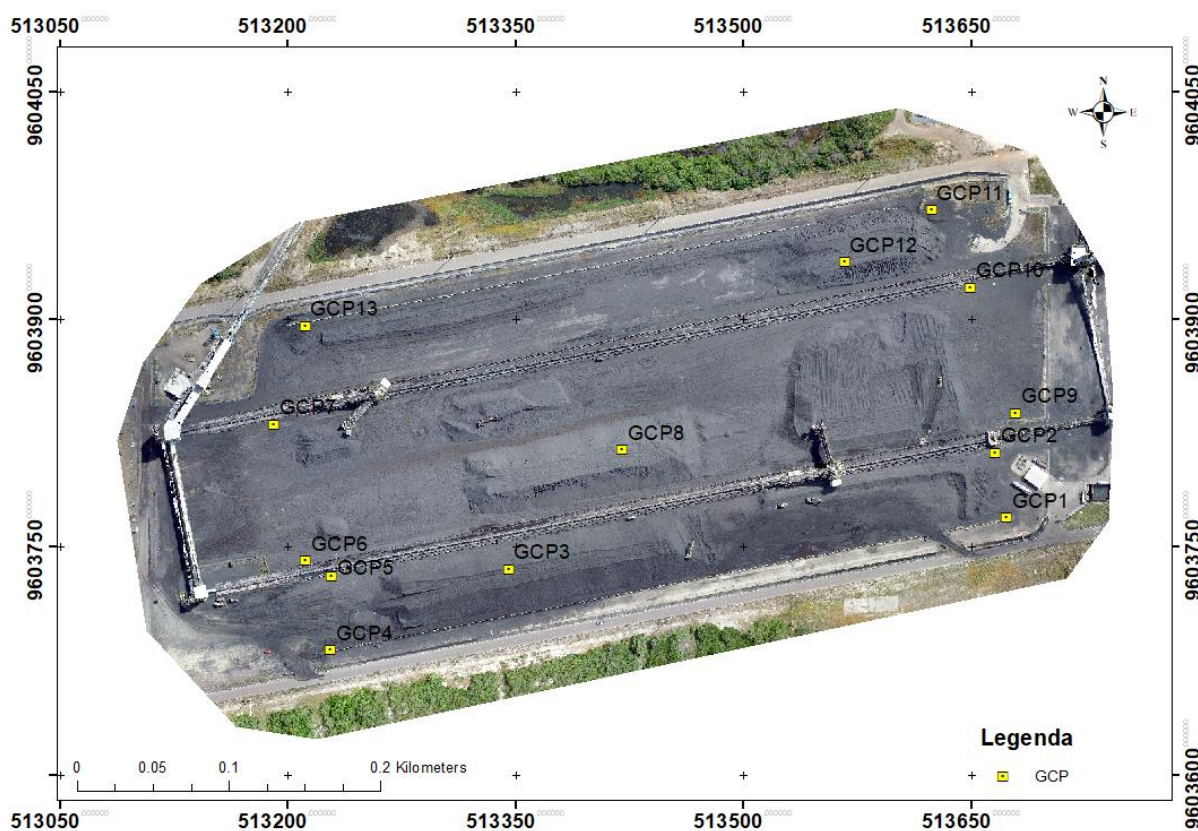
estudante do AutoCAD Civil 3D, versão 2017.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Análise da coleta de dados em sistema RTK

A Figura 7 mostra o mosaico da área sobrevoada e a espacialização dos GCPs. O GSD médio calculado pelo Pix4D para o voo a 70 metros foi 3,09 cm/pixel, 0,09 maior do que o estimado usando os parâmetros da câmera. Para o voo a 120 metros, o GSD dado pelo processamento foi 5,37 cm/pixel, 0,228 maior do que o estimado para a câmera para essa altura. Essa pequena diferença entre o GSD estimado e o GSD calculado pelos Softwares podem ocorrer devido às oscilações relacionadas ao movimento vertical do RPA em voo, devido, principalmente, ao vento. Além disso, o GSD dado pelos softwares é uma média para a área mapeada.

Figura 7. Mosaico da área do pátio de carvão mineral com distribuição dos pontos de GCPs.



Fonte: Autor (2018).

2.3.1.1 Análise de precisões do sistema RTK

A lista de coordenadas colhidas para os 13 GCP's são mostradas no Apêndice B. Vale ressaltar que as coordenadas ali colocadas são as médias de 3 (três) medidas colhidas pelo operador do sistema.

Na Tabela 1 estão apresentados os erros horizontais e verticais dados pelo GPS KTK para os 13 GCPs. No modo convencional, os dados de correção do sistema RTK são transmitidos por meio de um link de rádio do receptor instalado no vértice de referência (Base), fazendo, portanto, a correção em tempo real do ponto de interesse (Rover). A estação Base retransmite a fase da portadora que ela mediu, e as unidades móveis (Rover) comparam suas próprias medidas da fase com a recebida da estação de referência. Isto permite que as estações móveis calculem suas posições relativas com precisão milimétrica, ao mesmo tempo em que suas posições relativas absolutas são relacionadas com as coordenadas da estação base (ver precisões estimadas do modelo de RTK usado neste trabalho no item 2.2.3 da metodologia).

A tabela abaixo mostra que as precisões obtidas pelo sistema RTK são milimétricas. Essas precisões foram calculadas e disponibilizadas pelo modelo RTK e estão de acordo com o especificado pelo fabricante, tendo como referência as precisões prometidas pelo modelo, a classe de observação para as medidas que foram fixas, além da grande quantidade de satélites disponíveis no momento da medida (entre 13 e 14).

Tabela 1. Erros horizontais e verticais médias dado pelo sistema RTK para cada ponto de controle (GCPs).

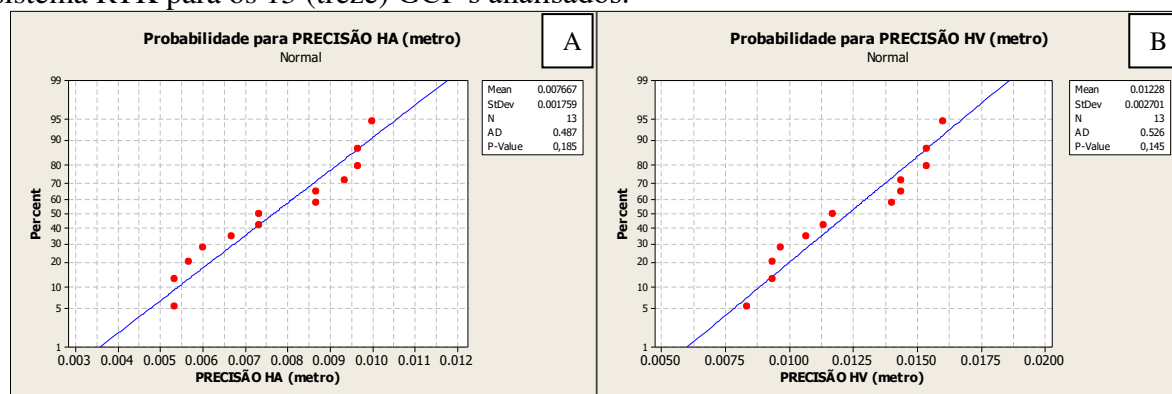
Ponto	Precisão HA (metro)	Precisão HV (metro)	Classe de Observação	QSD ¹
GCP1	0,005	0,009	Fixa	14
GCP2	0,006	0,009	Fixa	13
GCP3	0,007	0,012	Fixa	14
GCP4	0,010	0,016	Fixa	14
GCP5	0,009	0,014	Fixa	14
GCP6	0,005	0,008	Fixa	14
GCP7	0,009	0,014	Fixa	14
GCP8	0,007	0,011	Fixa	14
GCP9	0,010	0,015	Fixa	14
GCP10	0,010	0,015	Fixa	14
GCP11	0,007	0,011	Fixa	14
GCP12	0,009	0,014	Fixa	14
GCP13	0,006	0,010	Fixa	13

¹Quantidade de Satélites Disponíveis no momento da medida e usado na obtenção da coordenada pelo GPS.

Fonte: Elaborado pelo autor.

As precisões horizontais e verticais dos GCPs apresentados na Tabela 1, dados pelo sistema RTK, obedeceram a uma distribuição normal quando submetido à análise estatística, com P-value de 0,185 e 0,145 para as precisões horizontais e verticais, respectivamente, conforme Figura 8.

Figura 8. Teste de normalidade para precisões horizontais (A) e verticais (B) dados pelo sistema RTK para os 13 (treze) GCP's analisados.



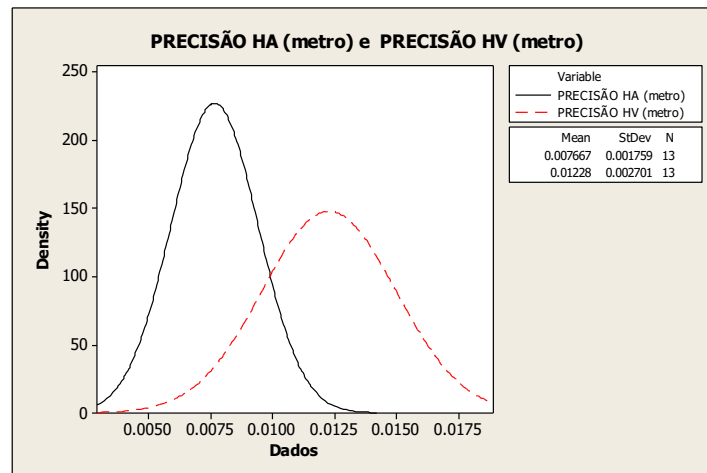
Fonte: Autor (2018).

O teste de normalidade no Minitab é feito com base na estatística de qualidade de ajuste de Anderson-Darling (AD), que mede a área entre a linha ajustada (com base na distribuição normal) e a função de distribuição empírica (que tem por base os pontos de dados). A estatística Anderson-Darling é uma distância ao quadrado que é ponderada mais pesadamente nas caudas da distribuição.

Segundo Montgomery (2004), o valor de p (P-Value) é uma probabilidade que mede a evidência contra a hipótese nula. Um valor de p menor fornece uma evidência mais forte contra a hipótese nula. Assim, para determinar se os dados não seguem uma distribuição normal é comparar o valor de p com o nível de significância. Geralmente, um nível de significância (denotado como α ou alfa) de 0,05 funciona bem. Um nível de significância de 0,05 indica um risco de 5% de concluir que os dados não seguem a distribuição normal quando eles realmente a seguem.

A Figura 9 mostra o histograma para os dados supracitados. É possível observar pela análise da figura que as imprecisões verticais calculadas pelo modelo de GPS são de aproximadamente o dobro das horizontais, comportamento esperado para equipamentos Geodésicos. Contudo, os erros dados pelo equipamento são bastante baixos, com média de 0,007667 metros e desvio padrão de 0,001799 para as precisões horizontais e média de 0,01228 metros e desvio padrão de 0,002701 para as precisões verticais.

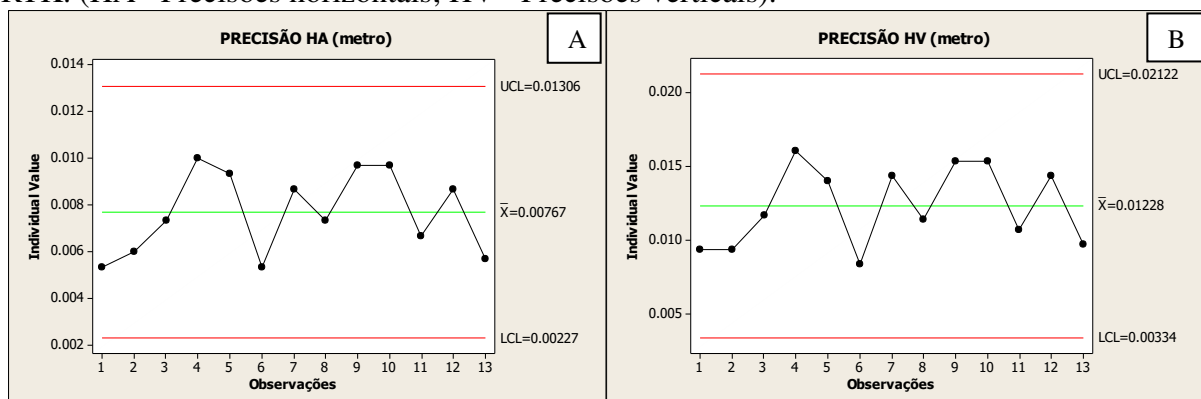
Figura 9. Histograma das precisões horizontais (HA) e verticais (HV) dadas para os GCPs pelo RTK.



Fonte: Autor (2018).

A Figura 10 traz as cartas de controle individual para as variáveis indicadas acima. Tanto a precisão horizontal (Figura 10A), que envolve as coordenadas Leste e Norte, como a precisão vertical (Figura 10B) estão dentro dos limites superior e inferior, estatisticamente estabelecidos para os dados, indicando que se trata de um processo que está sob controle. Assim, considerando que o modelo de RTK adotado para a coleta de pontos de GCPs é um processo sob controle, quando se trata do erro inerente à coleta das coordenadas, passamos agora a analisar os erros inerentes ao operador e ao processamento das imagens, tomando como base os erros relacionados aos GCPs no processo.

Figura 10. Cartas de controle para precisões horizontais (A) e verticais (B) dadas pelo sistema RTK. (HA - Precisões horizontais; HV - Precisões verticais).



Fonte: Autor (2018).

2.3.1.2 Análise da capacidade operador do sistema RTK

Um aspecto importante na implementação de um controle estatístico de um processo é assegurar a adequada capacidade do medidor ou coletor das informações que dará

base a análise. Segundo Montgomery (2004), conhecer a variabilidade atribuída ao operador é fundamental para que se possa entender quanto do erro é atribuído ao sistema de medidas e quanto do erro está relacionado ao operador. Nesse contexto, a Tabela 2 apresenta as coordenadas Leste, Norte e Elevação, colhidas pelo operador do sistema RTK para cada GCP, em 3 (três) repetições.

Tabela 2. Dados amostrais para as coordenadas Leste, Norte e Elevação, colhidos para fins de estudo de reprodutividade do operador do sistema RTK.

Nº DA AMOSTRA	Nº DA REPETIÇÃO	COORDENADAS		
		LESTE (m)	NORTE (m)	ELEVAÇÃO (m)
GCP1	GCP1-X1	513673.055	9603769.188	10.219
	GCP1-X2	513673.048	9603769.196	10.228
	GCP1-X3	513673.049	9603769.194	10.222
GCP2	GCP2-X1	513665.640	9603812.217	10.148
	GCP2-X2	513665.641	9603812.209	10.151
	GCP2-X3	513665.638	9603812.214	10.148
GCP3	GCP3-X1	513345.158	9603735.369	20.621
	GCP3-X2	513345.155	9603735.365	20.613
	GCP3-X3	513345.152	9603735.369	20.621
GCP4	GCP4-X1	513227.862	9603682.324	10.247
	GCP4-X2	513227.861	9603682.316	10.244
	GCP4-X3	513227.865	9603682.320	10.246
GCP5	GCP5-X1	513228.689	9603730.453	10.285
	GCP5-X2	513228.684	9603730.442	10.281
	GCP5-X3	513228.684	9603730.448	10.277
GCP6	GCP6-X1	513211.572	9603740.936	10.269
	GCP6-X2	513211.572	9603740.939	10.271
	GCP6-X3	513211.574	9603740.937	10.264
GCP7	GCP7-X1	513163.038	9603828.548	10.398
	GCP7-X2	513163.041	9603828.554	10.404
	GCP7-X3	513163.037	9603828.554	10.405
GCP8	GCP8-X1	513420.082	9603813.799	22.406
	GCP8-X2	513420.075	9603813.795	22.405
	GCP8-X3	513420.082	9603813.801	22.410
GCP9	GCP9-X1	513678.959	9603838.233	10.153
	GCP9-X2	513678.953	9603838.229	10.146
	GCP9-X3	513678.959	9603838.228	10.154
GCP10	GCP10-X1	513649.575	9603920.978	10.029
	GCP10-X2	513649.574	9603920.978	10.029
	GCP10-X3	513649.572	9603920.986	10.031
GCP11	GCP11-X1	513623.722	9603971.942	10.369

Continua...

	GCP11-X2	513623.721	9603971.942	10.363
	GCP11-X3	513623.726	9603971.941	10.371
GCP12	GCP12-X1	513566.711	9603937.438	18.610
	GCP12-X2	513566.711	9603937.438	18.604
	GCP12-X3	513566.712	9603937.449	18.613
GCP13	GCP13-X1	513211.060	9603895.649	10.463
	GCP13-X2	513211.051	9603895.650	10.463
	GCP13-X3	513211.053	9603895.648	10.455

Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 3 traz as coordenadas médias e o fator R (Range) para cada GCP, obtidos a partir dos dados colhidos em campo pelo operador do sistema RTK e apresentados na Tabela 3. Podem-se observar pela tabela que os valores de R são baixos, não ultrapassando a casa do centímetro, com exceção da coordenada Norte nos GCP's 5 e 12.

Tabela 3. Dados médios para as coordenadas Leste, Norte e Elevação, bem como fator R para as respectivas direções, colhidos para fins de estudo de reprodutividade do operador do sistema RTK.

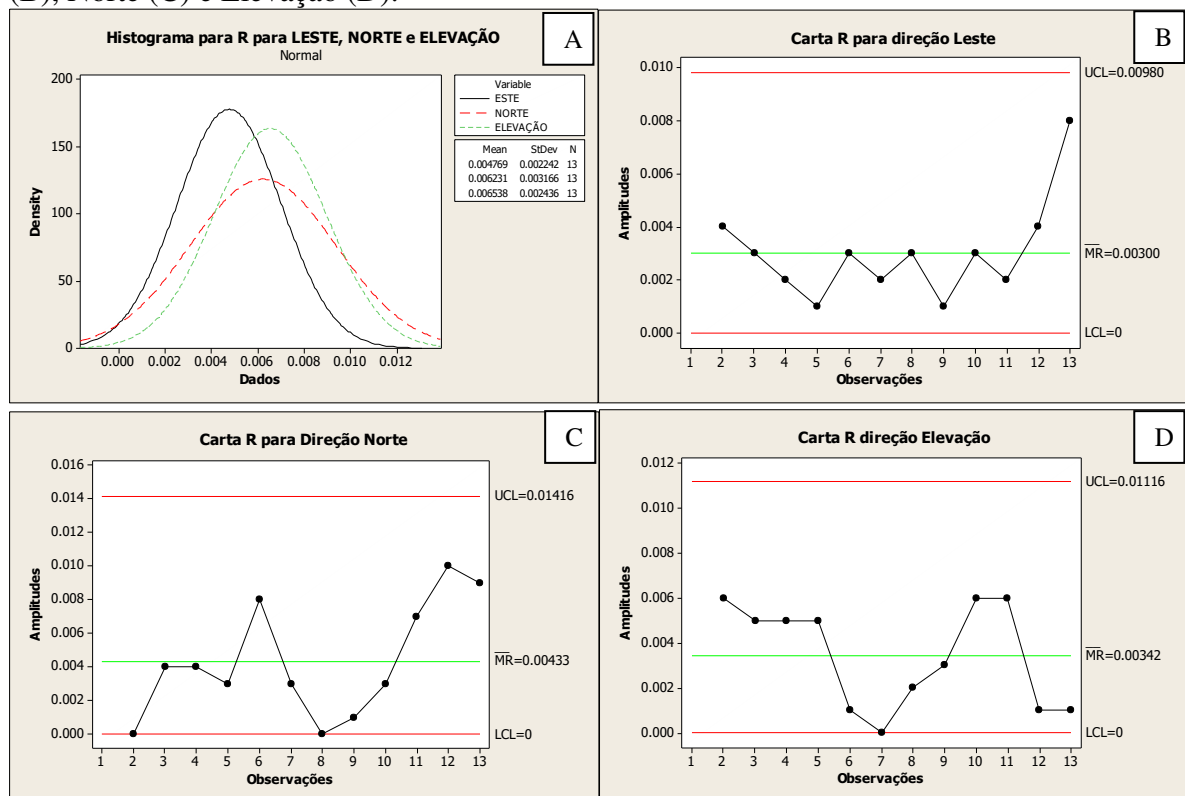
Nº AMO.	COORDENADAS MÉDIAS (\bar{x})			R (RANGE)		
	LESTE (m)	NORTE (m)	ELEVAÇÃO (m)	R LESTE (m)	R NORTE (m)	R ELEVAÇÃO (m)
GCP1	513673.051	9603769.193	10.223	0.007	0.008	0.009
GCP2	513665.640	9603812.213	10.149	0.003	0.008	0.003
GCP3	513345.155	9603735.368	20.618	0.006	0.004	0.008
GCP4	513227.863	9603682.320	10.246	0.004	0.008	0.003
GCP5	513228.686	9603730.448	10.281	0.005	0.011	0.008
GCP6	513211.573	9603740.937	10.268	0.002	0.003	0.007
GCP7	513163.039	9603828.552	10.402	0.004	0.006	0.007
GCP8	513420.080	9603813.798	22.407	0.007	0.006	0.005
GCP9	513678.957	9603838.230	10.151	0.006	0.005	0.008
GCP10	513649.574	9603920.981	10.030	0.003	0.008	0.002
GCP11	513623.723	9603971.942	10.368	0.005	0.001	0.008
GCP12	513566.711	9603937.442	18.609	0.001	0.011	0.009
GCP13	513211.055	9603895.649	10.460	0.009	0.002	0.008

Fonte: elaborada pelo autor.

O gráfico R mostra diretamente a magnitude do erro de medida, ou a capacidade do medidor, uma vez que representa a diferença entre medidas tomadas sobre a mesma unidade, utilizando-se o mesmo equipamento. A Figura 11 mostra um histograma (Figura 11A) e as cartas de controle para as direções Leste (Figura 11B), Norte (Figura 11C) e Elevação (Figura 11D).

Pela análise das cartas apresentadas na figura abaixo é possível indicar que, embora com bastante variações, a coleta de dados pelo operador está sob controle, significando que o operador do sistema ou equipamento não está tendo dificuldades em fazer mensurações utilizando o mesmo. Pontos fora de controle no gráfico de R indicam que o operador está tendo dificuldades em operar o equipamento (MONTGOMERY, 2004).

Figura 11. Histograma (A) e cartas de controle para o Fator *R* (Range) para as direções Leste (B), Norte (C) e Elevação (D).



Fonte: elaborada pelo autor.

O desvio padrão do erro de mensuração, σ_{medidor} , pode ser estimado com base na equação 2.9. Segundo Montgomery (2004), os limites de controle nas cartas são definidos por 3 desvios (3σ) acima ou abaixo do limite central ($3=L$). Dessa forma, a distribuição do erro de mensuração é bem aproximada pela normal e $6\sigma_{\text{medidor}}$ é uma boa estimativa da capacidade do medidor, considerando que as mensurações podem variar em até $\pm 3\sigma_{\text{medidor}}$.

Assim, considerando as médias de *R* para os vetores Leste, Norte e Elevação, a equação 2.9 e os dados para d_2 (1,693) apresentados no Apêndice I, os valores de erros para o conjunto operador/equipamento para os vetores Leste, Norte e Elevação são 0,00845, 0,0110 e 0,0116, respectivamente, para mais ou para menos.

2.3.2 Análise de processamento de dados em função dos GCP's

A Tabela 4 traz as diferenças em X (Leste), Y (Norte) e Z (Elevação) dados em relatório do Pix4D na etapa de processamento das imagens, para os voos a 70 e 120 metros de altura. Tratam-se dos erros entre as coordenadas dos GCPs, obtidas pelo RTK e usados no Software na etapa de inserção dos pontos de controles (etapa manual do processamento digital das imagens), e as coordenadas estimadas (calculadas) pelo Pix4DMapper para o mesmo ponto após ajustes e correções.

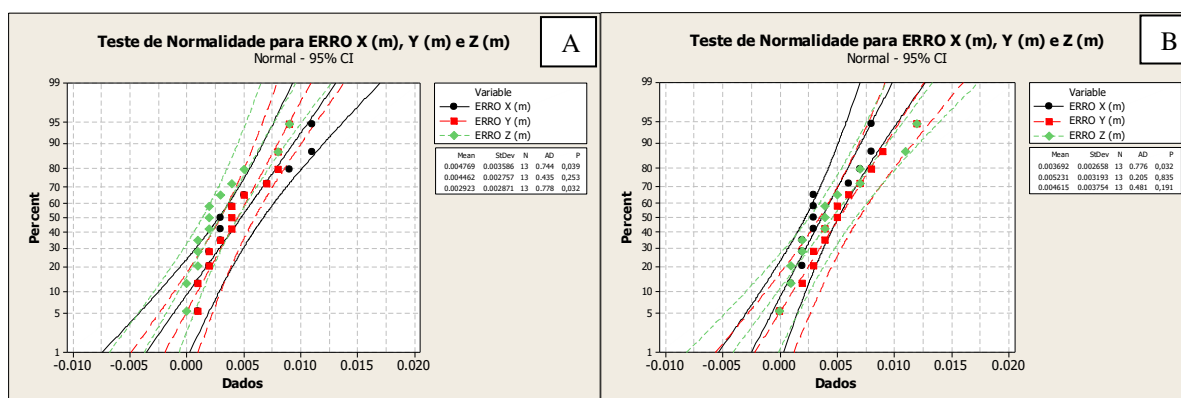
Tabela 4. Diferença de localização por GCP entre as coordenadas obtidas com GPS RTK e as coordenadas calculadas no processamento das imagens, para o mesmo ponto, nas três direções de coordenadas (Leste, Norte e Elevação), para os vôos a 70 e 120 metros.

Ponto	Erro Leste		Erro Norte		Erro na Elevação	
	70 (m)	120 (m)	70 (m)	120 (m)	70 (m)	120 (m)
GCP1	0,002	0,003	0,003	-0,003	0,005	-0,007
GCP2	-0,009	-0,008	-0,004	0,004	0,003	-0,001
GCP3	0,001	0,002	0,009	0,006	0,000	-0,011
GCP4	-0,003	0,002	-0,005	-0,009	-0,002	0,001
GCP5	-0,004	-0,008	0,004	0,012	0,004	0,002
GCP6	0,003	0,001	-0,004	0,000	-0,000	0,002
GCP7	0,011	0,007	0,001	-0,008	-0,001	0,000
GCP8	0,003	0,000	-0,008	-0,005	-0,001	0,004
GCP9	-0,002	0,003	-0,001	-0,003	-0,002	-0,004
GCP10	-0,007	0,003	-0,002	-0,004	0,009	0,004
GCP11	0,005	0,003	0,007	-0,007	-0,008	-0,005
GCP12	0,001	0,002	-0,008	0,002	0,002	0,007
GCP13	-0,011	-0,006	0,002	0,005	-0,001	-0,012

Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 12 apresenta o teste de normalidade para os erros nas direções Leste, Norte, e Elevação, para os voos a 70 (A) e 120 (B) metros de altura, conduzido com um nível de confiança de 95%. Na referida figura nota-se que as variáveis Leste e Elevação (X e Z) para o voo a 70 metros de altura e a variável Leste (X) para o voo a 120 metros de altura apresentaram valores de P-Value menor que 0,05.

Figura 12. Teste de normalidade para erros de GCP's nas coordenadas Leste, Norte e Elevação, para os voos a 70 (A) e 120 metros de altura (B).



Fonte: elaborado pelo autor.

Segundo Montgomery (2004), para o estudo do comportamento de uma variável fazendo uso de cartas de controle requer que os dados, nesse caso dados de erros, apresentem normalidade estatística. Contudo, mesmo com algumas das variáveis (Leste e Elevação para o voo a 70 metros de altura e a variável Leste para o voo a 120 metros de altura) apresentando evidências fracas para o teste de normalidade do conjunto de dados, para efeitos didáticos, como várias variáveis estudadas apresentaram comportamento normal quando submetidas ao teste de normalidade resolveu-se apresentar os dados fazendo uso de estatística e cartas de controle.

O teste ANOVA em tratamento fatorial, comparando os erros atribuídos aos CGP's, para as alturas de voos de 70 e 120 metros, considerando as direções Leste, Norte e Elevação. Para aplicação do teste, como o conjunto de dados apresenta números positivos e negativos (por se tratar da direção do erro), foi aplicado o módulo, com a finalidade de melhorar a apresentação dos dados.

A ANOVA revelou não haver diferença estatística para os erros atribuídos aos GCP's, dados gerados no ajuste pelo software Pix4DMapper, entre as alturas de voos, bem como não houve interação entre as direções dos erros (Leste, Norte e Elevação). A Tabela 5 apresenta o teste de Tukey para um nível de confiança de 95%.

Tabela 5. Resumo do quadro da ANOVA com valores de F_c e P_r para erros atribuídos à GCP's na fase de processamento de imagens de RPA's, considerando duas alturas de voo (70 e 120 metros de altura).

Fonte de Variação	* F_c	$P_r F_c$
Altura de voo	0,415 ^{ns}	0,5215
Direção (Leste, Norte e Elevação)	0,758 ^{ns}	0,4722
Interação (Altura*Direção)	1,291 ^{ns}	0,2812

F_c = Valor do Teste F da anova. P_r = Valor de significância do teste F da ANOVA. ^{ns} = não significativo pelo teste F. *Valor F_c em percentual.

Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 6 apresenta o teste de Tukey para as médias para os fatores altura e direção do vetor (coordenada). Pela análise da tabela é possível ver que não houve diferença estatística entre erros calculados para os GCP's para as duas alturas de voo e que não houve interação entre as alturas de voos e as direções dos vetores (Leste, Norte e Elevação). Esse comportamento indica que a altura de voo não é um fator que influencia no ajuste e nos erros atribuídos aos GCP's, na fase de processamento digital de imagens de RPA através da plataforma Pix4DMapper, quando considerando alturas de voos de 70 e 120 metros de altura.

Tabela 6. Médias dos fatores altura e erros nas direções (coordenadas) dos vetores para as duas alturas voos (70 e 120 metros de altura).

Alturas	Erro (m)¹
70 m	0,00405±0,0005 a
120 m	0,00451±0,0005 a
Direção	Erro (m)
Leste	0,00423±0,0006 a
Norte	0,00485±0,0006 a
Elevação	0,00377±0,0007 a

¹= Erro padrão da média. Teste de Tukey para nível de 95% de confiança.

Fonte: elaborada pelo autor.

Os resultados permitem aceitar a hipótese H_0 que diz que altura de voo não interfere de forma negativa no ajuste interno dos GCP's pelo software na etapa de processamento. Como não houve interação entre os fatores analisados, serão apresentados, a seguir, as cartas de controle de forma individualizada para as duas alturas de voos, nas três direções (coordenadas Leste, Norte e Elevação).

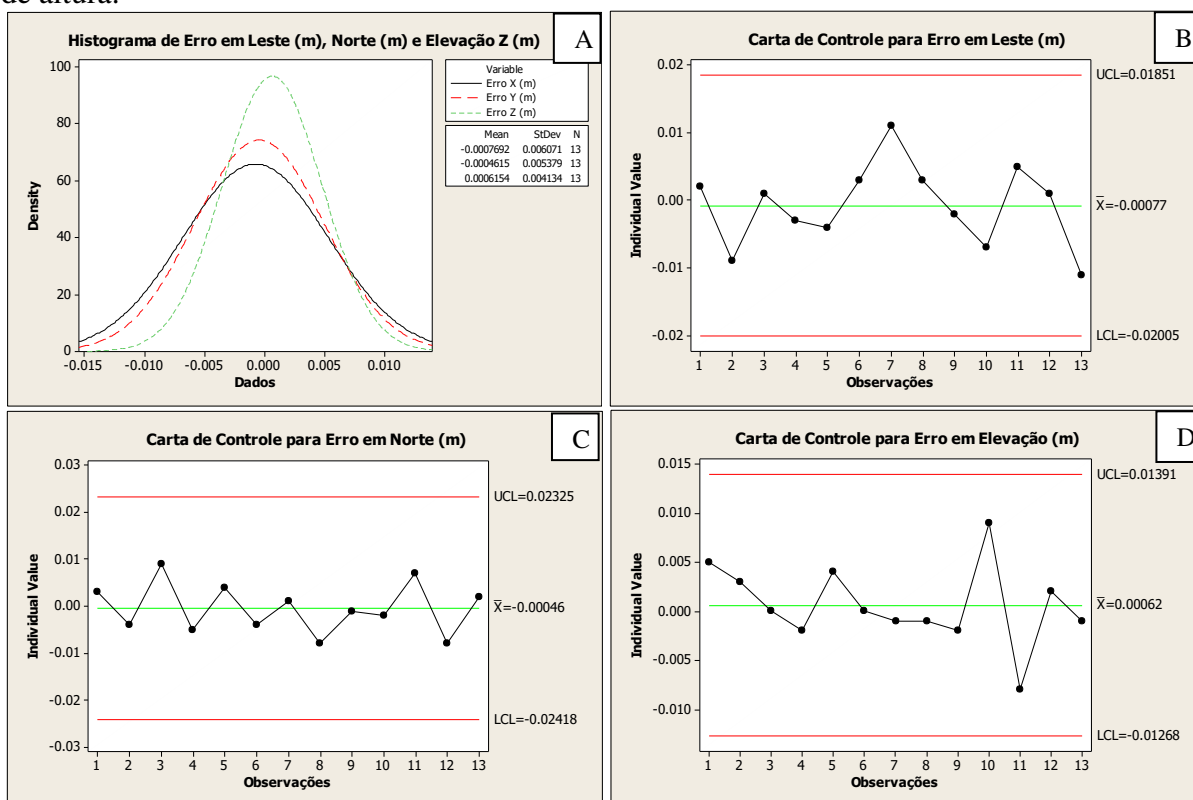
2.3.2.1 Cartas de Controle para voo a 70 metros

Os gráficos de controle são fundamentais para o monitoramento do processo, examinando a variabilidade dos dados, distinguindo entre causas comuns e causas especiais (pontos fora dos limites de controle, causados por alguma variação fora do normal). A causa comum é definida como uma fonte de variação que afeta todos os valores individuais de um processo e é resultante de diversas origens, sem que nenhuma tenha predominância sobre a outra. Assim, um processo é dito sob controle, ou estatisticamente estável, quando somente causas comuns estiverem presentes e controladas, condições observadas no presente trabalho (MONTGOMERY, 2004).

A Figura 13 apresenta o histograma (Figura 13A) e as cartas de controle para as

variáveis Leste (Figura 13B), Norte (Figura 13C) e Elevação (Figura 13D) para o voo a 70. De uma forma geral, os erros, representados pela diferença entre as coordenadas colhidas com o sistema RTK e as coordenadas geradas pelo processamento para o mesmo ponto, indicadas no relatório de erros, apresentam-se baixos para Leste, Norte e Elevação, com todas as variáveis testadas estando dentro dos limites de controle, indicando, portanto, que o processo se encontram sob controle.

Figura 13. Histograma (A) e cartas de controle para os erros dados em relatório pelo Pix4D para os GCPs para as coordenadas Leste (B), Norte (C) e Elevação (D) para o voo a 70 metros de altura.

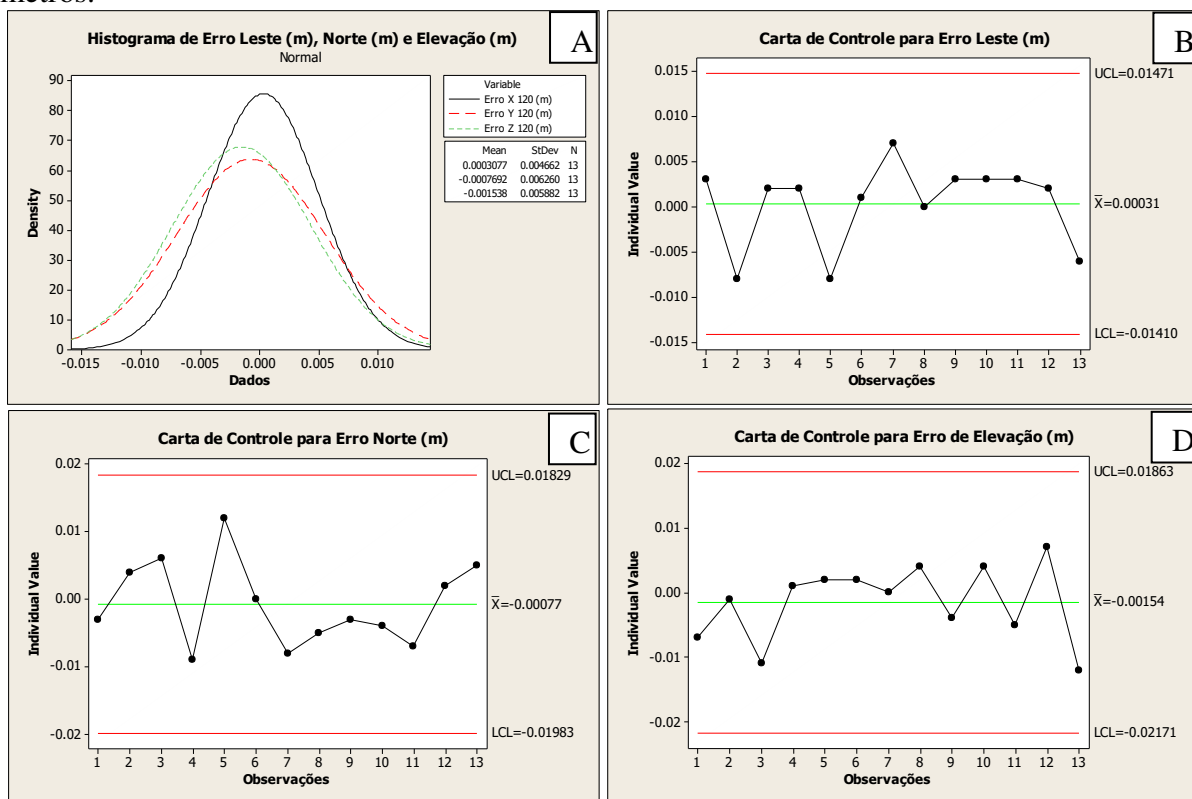


Fonte: elaborado pelo autor.

2.3.2.2 Cartas de Controle para voo a 120 metros

A Figura 14 exibe o histograma (Figura 14A) e as cartas de controles para as variáveis Leste (Figura 14B), Norte (Figura 14C) e Elevação (Figura 14D) para o voo a 120 metros de altura. Pode ser observado, pela análise da figura, que a variação nos erros não foi grande o suficiente para produzir modificações no comportamento das variáveis Leste, Norte e Elevação, de forma a criar pontos fora dos limites estatísticos produzidos pelo conjunto de dados para essas variáveis. Esse comportamento indica que o processo se encontra sob controle.

Figura 14. Histograma (A) e cartas de controle para os erros dados em relatório pelo Pix4D para os GCPs para as coordenadas Leste (B), Norte (C) e Elevação (D) para o voo a 120 metros.



Fonte: elaborado pelo autor.

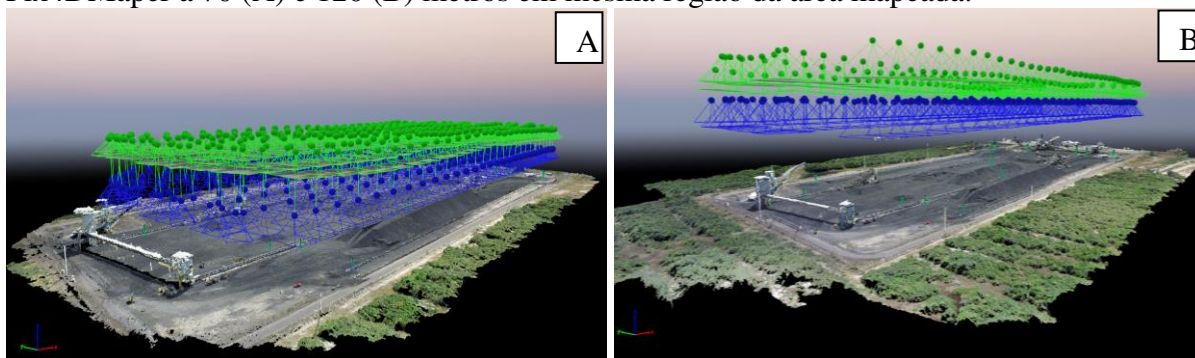
O comportamento geral apresentado pelos dados de erros atribuídos aos GCP's para o voo a 120 metros de altura foi bastante satisfatório, uma vez que, além de estar sob controle, mostrou variações muito próximas das variações apresentada pelo voo a 70 metros de altura, indicando que, neste caso, nem a altura de voo nem a variação na sobreposição interferiram na qualidade do processamento e ajuste interno dos dados referente aos GCP's na etapa de ajustamento pelo software. Dessa forma, os resultados indicam que a altura de voo, considerando 70 e 120 metros de altura, bem como a variação na sobreposição, não influenciou de forma negativa no ajuste dos GCP's pelo software.

A análise estatística apresentada nas tabelas 5 e 6 corroboram com esse entendimento, uma vez que não apresentou diferença estatística entre os erros atribuídos aos GCP's na etapa de processamento para as alturas de voo de 70 e 120 metros de altura, nem houve interação entre os vetores (Leste, Norte e Elevação), indicando que, nesse caso, os erros dos vetores Leste, Norte e Elevação não interferem uns nos outros.

2.3.3 Análise comparativa de volumes

Uma vez conhecidos os resultados de processamento para qualidade da coleta de dados pelo sistema RTK e dos ajustes dos pontos de controles (GCP's) para os dados referentes às duas alturas de voo, passa-se agora a analisar os resultados concretos de dados de volumes, que de certa forma traduzem a qualidade da nuvem de pontos, para algumas pilhas de carvão mineral, considerando os dados de nuvem de pontos para as duas alturas de voos. A Figura 15 apresenta uma vista em perspectiva da nuvem de pontos produzida pelo Pix4DMapper para os voos a 70 metros e (Figura 15A) e a 120 metros de altura (Figura 15B).

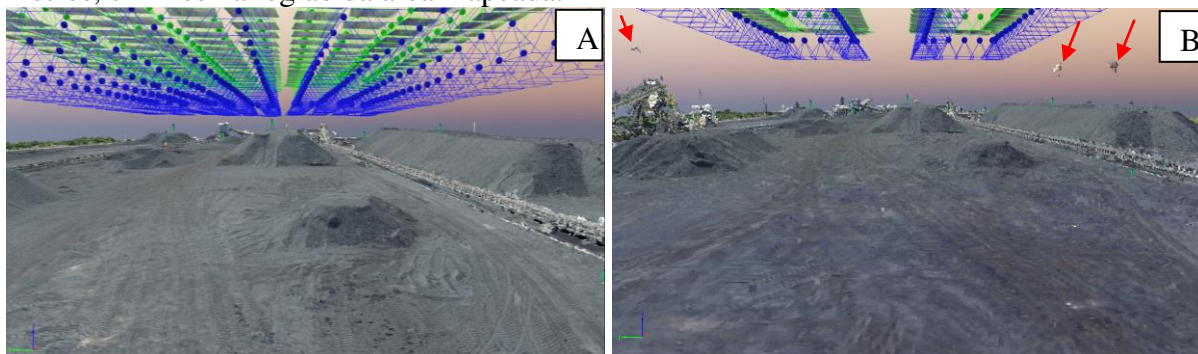
Figura 15. Vista em perspectiva com detalhe da nuvem de pontos 3D em plataforma Pix4DMapper a 70 (A) e 120 (B) metros em mesma região da área mapeada.



Fonte: Autor (2018).

Ainda antes de apresentar dados comparando volumes a partir de nuvem de pontos produzidas com dados dos voos a 70 e a 120 metros de altura, mostra-se na Figura 2.16 detalhes da nuvem de pontos, com foco no simples efeito visual da nuvem de pontos colorida, produzida pelo software, para as duas alturas de voos testadas. Visualmente é possível observar na figura que a nuvem de pontos produzida a partir do processamento das imagens coletadas a 70 metros de altura (Figura 16A), portanto com GSD menor, apresenta-se mais densa e com maior nível de detalhes, sem aparecer pixels “estourados”(ver setas de cor vermelha na Figura 16B), como é possível observar na parte superior direita e esquerda da figura com a nuvem de pontos produzida a partir do voo a 120 metros (Figura 2.16B).

Figura 16. Detalhe de nuvem de pontos 3D em plataforma Pix4D Mapper a 70 (A) e 120 (B) metros, em mesma região da área mapeada.

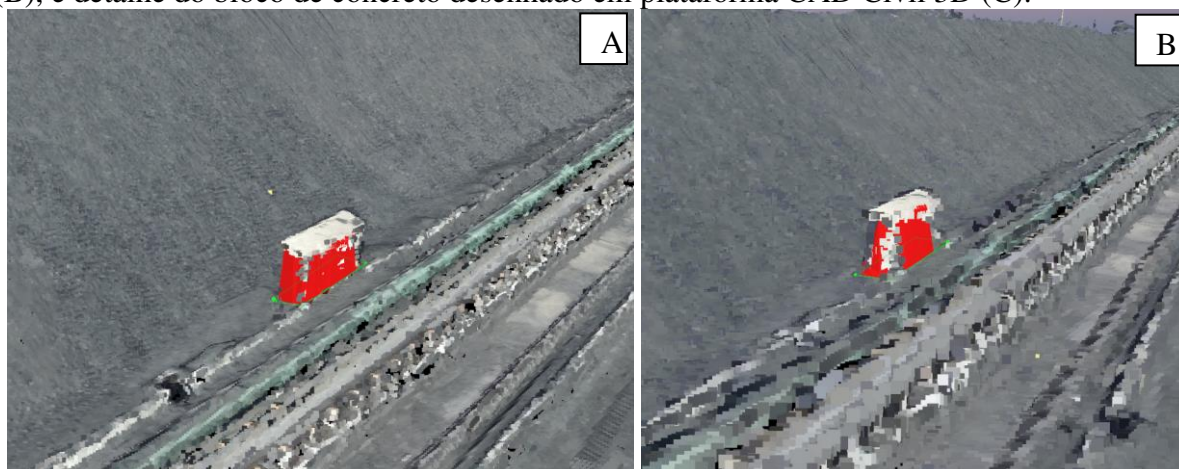


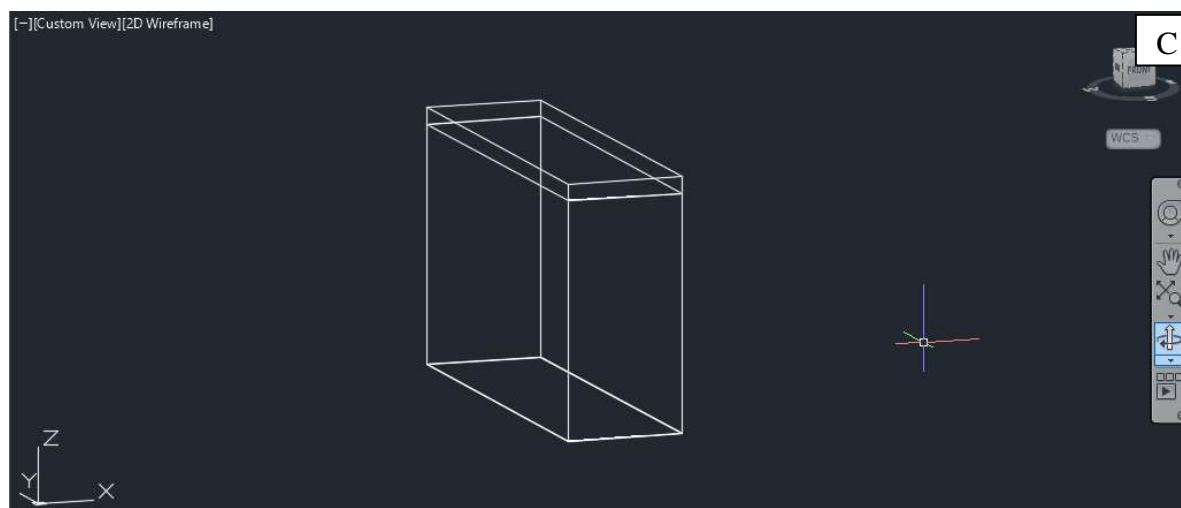
Fonte: Autor (2018).

Voltamos agora à análise os resultados de dados de volumes para algumas pilhas de carvão mineral e para uma estrutura adotada como controle (estrutura de concreto dentro do pátio, medida com trena de aço). A Figura 17 mostra em detalhe a mesma estrutura no processo de aferição de volume, considerando os dados para o voo a 70 metros (Figura 2.17A), voo a 120 metros (Figura 17B) e o desenho em bloco da estrutura em plataforma CAD (Figura 17C).

É importante ressaltar que os dados de volumes obtidos a partir da nuvem densa de pontos foram calculados no próprio software Pix4DMapper, como mostra a figura abaixo, e que o cálculo do volume obtido do bloco de concreto foi efetuado em plataforma CAD Civil 3D, a partir dos dados colhidos em campo da estrutura.

Figura 17. Detalhe em perspectiva da estrutura de concreto usada como referência no processo de cálculo de volume no próprio Pix4D para os voos a 70 metros (A) e 120 metros (B), e detalhe do bloco de concreto desenhado em plataforma CAD Civil 3D (C).





Fonte: Autor (2018).

A Tabela 7 observam-se os resultados de volumes calculados para a estrutura de concreto referência. Os resultados de volumes a partir da nuvem de pontos, considerando as duas alturas de voos, e obtidos pela própria plataforma Pix4DMapper foram bem aproximados do volume real, calculado a partir de plataforma CAD, considerando as medidas reais de campo obtidas por meio de trena de aço do referido bloco de concreto.

O valor real do volume para o bloco de concreto é de 14,61 m³, calculado em plataforma CAD. O valor de volume obtido para o mesmo bloco de concreto a partir da nuvem de pontos produzida pelo processamento dos dados para o voo a 70 metros de altura foi superior ao volume real em 0,52 m³, 3,56% acima do valor real de volume do bloco. Já o volume obtido a partir do voo a 120 metros de altura foi inferior ao volume real em 0,68 m³, representando uma diferença de 4,65%.

Tabela 7. Valores de volumes para o bloco de concreto, tido como referência, cálculos pelo Pix4D Mapper e o volume real obtido em plataforma CAD Civil 3D, bem como desvio padrão dos dados dado pelo Pix4D para cada altura de voo.

ALTURA DE VOO (m)	BLOCO DE CONCRETO		DIFERENÇA (m ³)	%
	VOLUME (m ³)	DES. PADRÃO (m ³)		
70	15,13*	0,30*	-0,52	103,56
120	13,93*	0,66*	0,68	95,35
CAD	14,61**	-	-	100

*Volumes e desvio padrão obtidos pelo software Pix4DMapper. **Volume obtido em plataforma CAD Civil 3D.

Fonte: elaborada pelo autor.

A diferença entre os dados de volumes obtidos a partir da nuvem de pontos 3D, para os voos a 70 e a 120 metros de altura foi de 1,20 m³, correspondendo a 8,21%. Esse valor

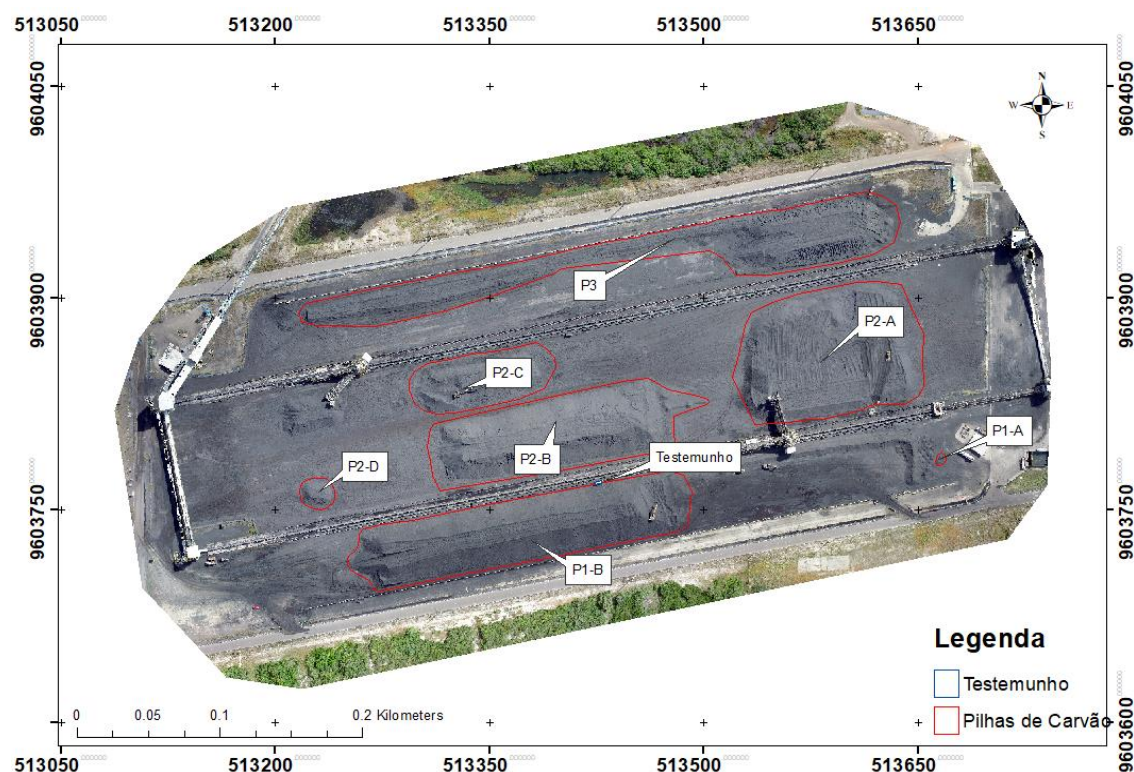
de diferença para as duas alturas de voos parece bastante elevado. Porém, essa diferença já era esperada, uma vez que o fabricante do software alerta sobre possíveis diferenças nos resultados de volumes quando se aumenta ou diminui o GSD e se modifica a sobreposição (Pix4D, 2018). Um aspecto positivo é que os resultados de volumes obtidos a partir das nuvens de pontos produzidas pelos voos a 70 e a 120 metros de altura ficaram acima e abaixo do volume real, respectivamente, indicando, neste caso, não haver tendência.

Vale ressaltar que a estrutura de concreto adotada como controle para esse caso tem volume real bastante pequeno, o que pode ampliar o erro de volume obtido por métodos de geração de nuvem de pontos 3D por meio de processamento digital de imagens de RPA's, uma vez que esses softwares geram pontos com base no tamanho do pixel no solo ou GSD e na sobreposição (REMONDINO et al., 2016).

Uma estrutura com volume real obtida diretamente em campo, para efeitos de comparação do método, como é nosso caso, pode ser pouca para obter resultados conclusivos sobre o processo. Porém, como a área mapeada não dispunha de muitas estruturas com medidas fáceis de coletar, só foi possível colher uma amostra. Para melhor entendimento do comportamento dos dados de volumes produzidos para as duas alturas de voos, passa-se agora a estudar a diferença entre medidas de volumes de diferentes tamanhos de pilhas para os voos a 70 e a 120 metros de altura.

A Figura 18 apresenta um croqui com a vetorização do grupo de pilhas de carvão mineral que serão usadas para fins de comparação, em termos de quantitativo de volume, para as duas alturas de voos testadas. A referida figura indica a localização das pilhas, bem como a nomenclatura adotada para cada pilha, além da estrutura de concreto tida como controle e anteriormente representada.

Figura 18. Representação da distribuição espacial das pilhas de carvão mineral no pátio da UTE (Usina Termoeletrica da Pecém), bem como do bloco de concreto usado como referência no processo de comparação entre volumes para voos conduzidos a 70 e a 120 metros de altura.



Fonte: Autor (2018).

Vale ressaltar que, para efeito de comparação de volume entre as pilhas, foram mantidas as referências topográficas (horizontais e verticais) dos vetores que descrevem cada pilha. Isso só foi possível pelo fato de o Pix4DMapper apresentar uma ferramenta de importação e exportação de vetores com referências planialtimétricas. Além disso, a ferramenta também permite a manipulação da cota de referência das superfícies, que podem ser adotadas como referências no processo de aferições de volumes.

A Tabela 8 apresenta os resultados de volume de carvão mineral para cada uma das pilhas mostradas no croqui da Figura 18. Na tabela pode ser observado 7 (sete) pilhas com tamanhos ou volumes variados, escolhidas e calculadas com o objetivo de obter-se dados que possam traduzir o comportamento dos erros, considerando o tamanho dos objetos analisados.

Tabela 8. Resultados de volume, desvio padrão e diferenças produzidas para pilhas de carvão mineral em processo de aferição de volumes através de uso de RPA e processamento digital de imagens, considerando alturas de voos de 70 e 120 metros de altura.

PILHAS DE CARVÃO	MEDIDAS PARA DIERENTES ALTURAS DE VOOS			DIFERENÇA** Voo 70-120 m (m³)	%	COTA DE BASE (m)
	QUANTITATIVO*	70 METROS	120 METROS			
P1-A	Volume (m³)	11,15	8,83	2,32	20,81	10,26
	Des. Padrão (³)	1,95	2,64	-0,69	-35,38	
P1-B	Volume (m³)	54.790,73	54.209,86	580,87	1,06	10,23
	Des. Padrão (m³)	452,35	746,04	-293,69	-64,93	
P2-A	Volume (m³)	28.879,57	29.067,55	-187,98	-0,65	10,16
	Des. Padrão (³)	443,24	752,13	-308,89	-69,69	
P2-B	Volume (m³)	45.946,33	45.160,48	785,85	1,71	10,44
	Des. Padrão (³)	363,16	581,77	-218,61	-60,20	
P2-C	Volume (m³)	4.603,89	4.340,65	263,24	5,72	10,41
	Des. Padrão (³)	124,32	159,32	-35,00	-28,15	
P2-D	Volume (m³)	583,05	585,97	-2,92	-0,50	10,37
	Des. Padrão (³)	17,65	29,39	-11,74	-66,52	
P3	Volume (m³)	24.489,21	23.288,93	1200,28	4,90	10,42
	Des. Padrão (m³)	428,53	653,55	-225,02	-52,51	

*Volume e desvio padrão obtidos diretamente pela plataforma Pix4DMapper.

**Diferença nas medias de volumes e desvio padrão para as alturas de voos de 70 e 120 metros de altura.

Fonte: elaborada pelo autor.

Pela observação dos dados é possível constatar que há diferença entre as medidas de volumes para as pilhas, quando comparando os dados de volumes produzidos a partir dos voos a 70 e a 120 metros de altura. De acordo com o quadro, a pilha que mostrou maior diferença foi a menor pilha (P1-A), apresentando volume menor para o voo 120 metros de altura, quando comparado com o voo a 70 metros, redução essa da ordem de 20,81%, maior medida de discrepância entre os dados estudados.

De uma forma geral, as maiores pilhas mostraram menor diferença entre as medidas de volumes, com percentagens relativas menores que 2%, com exceção da pilha P3, que se mostrou menor para voo a 120 metros de altura em 4,90%. Por outro lado, a pilha 2-D, relativamente pequena, mostrou-se com valores de volumes bem aproximados para as duas alturas de voo, o que pode indicar certa aleatoriedade dos erros inerentes a medida.

Observa-se ainda que, 2 (duas) das 7 (sete) medidas de volumes testadas apresentaram valores de volumes maiores para o voo a 120 metros de altura (P2-A e P2-D), sendo que esses valores percentuais de aumento não ultrapassaram 1% (0,65 % e 0,50, para

P2-A e P2-D, respectivamente) em relação à medida de volume feita a partir do voo a 70 metros. Das 5 (cinco) pilhas que apresentaram valores menores de volumes para o voo a 120 metros de altura em relação ao voo a 70 metros, P3 e P2-C foram as que apresentaram maiores diferenças, com 4,90% e 5,72%, respectivamente.

Esse comportamento dos dados pode indicar que a diminuição na sobreposição, associada ao aumento da altura de voo, tendo como consequência o aumento do pixel em solo (GSD) e diminuição na resolução espacial, podem levar a produzir dados quantitativos inferiores para medidas de volumes, em relação às medidas efetivas. Outro fator que reforça esse comportamento pode ser observado na Tabela 7, em que apresenta os dados comparativos de volumes um bloco de concreto tido como referência, onde o volume observado para o voo a 120 metros de altura foi 4,65% menor que o volume real do referido bloco.

Outra tendência observada nos dados é a de que o desvio padrão apresentado pelo software em questão (Pix4DMapper) apresenta-se sempre maior para o voo a 120 metros de altura, o que já era esperado, uma vez que os modelos que descrevem esses desvios têm relação com o tamanho do GSD (Pix4D, 2018). Segundo o desenvolver do software, o desvio padrão dos erros de volume é calculado com base nos erros obtidos para cada célula (ver material e método) e pode variar de 1 uma a 3 (três) vezes o tamanho do GSD, para coordenada z. Vale salientar ainda que, em 3 (três) das 7 (sete) pilhas, o valor do erro padrão da medida a 120 metros não supera nem a diferença quantitativa entre os dados de volumes para voos a 70 e 120 metros de altura (pilhas P2-B, P2-C e P3), o que reforça que, mudanças na altura de voo e na sobreposição, podem produzir efeitos sobre dados de volumes que vão além do que pode ser explicado apenas usando o desvio padrão.

2.4 CONCLUSÕES

Tanto os erros horizontais e verticais relacionados ao modelo de RTK e ao operador, bem como os erros relacionados ao ajuste de coordenadas Este, Norte e Elevação dos GCPs para os vôos a 70 e 120 metros de altura ficaram dentro dos limites de controle, indicando, portanto, que nesse caso o processo encontra-se sob controle.

As alturas de vôo a 70 e a 120 metros de altura, bem como a variação na sobreposição, não interferiram de forma negativa no ajuste dos erros dos GCP's na etapa de processamento dos dados pelo software Pix4DMapper.

Embora a variação na altura de voo e na sobreposição lateral não tenha produzido efeitos negativos sobre o ajuste em relação aos GCP's, houve variações nos resultados de volumes, com efeitos negativos maiores sobre pilhas de dimensões menores.

A diminuição na sobreposição para o voo a 120 metros de altura produziu dados quantitativos de volumes que apresentaram tendências a serem menores.

REFERÊNCIAS

ALCOFORADO, M. S; FERNANDES, B. T. Aplicação de Algoritmos de Visão Computacional para UVAs em Missões de Busca. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**. [S.I], v.2, n. 1, p. 315-322, 2016.

BARRY, P; COAKLEY, R. Field accuracy test of rpas photogrammetry. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. Rostock, Germany, v. xl-1, n.w2, p. 4 – 6, 2013.

BENDEA, H. F; CHIABRANDO, F; TONOLO, F. G; MARENCHINO, D. Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV the Augusta Bagiennorum. Test site. In: **XXI International Symposium**. Athens, Greece: Anais 2007. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.222.2807&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 23 out. 2016.

EXÉRCITO BRASILEIRO – CONCAR-EB. **Especificação técnica para a aquisição de dados geoespaciais vetoriais**. Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais. 2.ed. Brasil, 2011.

DEUS, Bell Rodrigo Brito da Silva. **Mapeamento 3D com drone para suporte ao BIM aplicado a arquitetura**. Santa Catarina : Universidade Federal de Santa Catarina, 2017. 82 f.

HORCHER, A; VISSER, R. J. M. Unmanned Aerial Vehicles: Applications for Natural Resource Management and Monitoring. In: **Council on Forest Engineering Annual Meeting, Hot Springs (AR).USA**: Anais, 2004. Disponível em: http://www.cofe.frec.vt.edu/documents/2004/COFE_2004_Horcher_Visser.pdf. Acesso em: 23 out. 2016.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4.ed. São Paulo: LTC, 2004. 513 p.

NASCIMENTO, M. L.M. **Utilização de drone e termografia na detecção de manifestações patológicas em edificações**. Brasília: Universidade Católica de Brasília, 2014. 26 f.

NIEDERHEISER, R; MOKROS, M; LANGE, J; PETSCHKO, H; PRASICEK, G; ELBERINK, S. O. Deriving 3d point clouds from terrestrial photographs - comparison of different sensors and software. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. [S.I], v. XLI-B5, 2016. Disponível em: <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLI-B5/685/2016/isprs-archives-XLI-B5-685-2016.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2016.

OIKONOMOU, C; STATHOPOULOU, E. K; GEORGOPOULOS, A. Contemporary data acquisition technologies for large scale mapping. In: **35th EARSeL Symposium – European Remote Sensing: Progress, Challenges and Opportunities**. Stockholm, Sweden: Anais: 2015.

PATIAS, P; SAATSOGLU-PALIADELI, C; GEORGOULA, O; PATERAKI, M; STAMNAS, A; KYRIAKOU, N. Photogrammetric documentation and digital representation of the Macedonian palace in Vergina-Aegeae. In: **CIPA, XXI International CIPA Symposium**. Athens, Greece: Anais, 2007. Disponível em: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-C53/papers/FP112.pdf>. Acesso em: 25 out. 2016.

PIX4D. **TOOLS - GSD Calculator**. Disponível em: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202560249-TOOLS-GSD-Calculator#gsc.tab=0>. Acesso em: 25 out. 2016.

PIX4D. **Suporte**. Disponível em: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559239-How-Pix4Dmapper-calculates-the-Volume->. Acesso em: 10 jul. 2018.

REIDELSTUERZ, P; LINK, J; GRAEFF, S; CLAUPEIN, W. Uav (unmanned aerial vehicles) für Präzisionslandwirtschaft. 13 Workshop Computer Bildanalyse in der Landwirtschaft. Workshop Precision Farming, In: **Bornimer Agrartechnische Berichte**. [S.I]: Anais 61, 2007. p. 75-84. Disponível em: <https://www.uni-hohenheim.de/en/organization/publication/uav-unmanned-aerial-vehicles-fuer-praezisionslandwirtschaft>. Acesso em: 20 out. 2016.

REMONDINO, F; EL-HAKIM, S. F; GRUEN, A; ZHANG, L. Turning images into 3D models – development and performance analysis of image matching for detailed surface reconstruction of heritage objects. **IEEE Signal Processing Magazine**. [S.I]. v.25, n.4, p. 55–65. 2008.

REMONDINO, F; BARAZZETTI, L; NEX, F; SCAIONI, M; SARAZZI, D. Uav photogrammetry for mapping and 3d modeling–current status and future perspectives. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. [S.I], v.38, n.1, p.22, 2011.

REMONDINO, F; SPERA, M.G; NOCERINO, E; MENNA, F; NEX, F. State of the art in high density image matching. In: **The Photogrammetric Record 29**. [S.I], 2014. p. 144–166. Disponível em: http://3dom.fbk.eu/sites/3dom.fbk.eu/files/pdf/Remondino_etal_PhotoRecord29-146.pdf. Acesso em: 25 out. 2016.

ROCK, G; RIES, J. B; UDELHOVEN, T. Sensitivity Analysis of UAV Photogrammetry for Creating Digital Elevation Models (DEM). In: **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. Zurich, Switzerland: Anais, 2011. p. 70 – 73. Disponível em: http://www.geometh.ethz.ch/uav_g/proceedings/rock. Acesso em: 25 out. 2016.

FERREIRA, A. M. R; ROIG, H. L; MAROTTA, G. S; MENEZES, P. H. B. J. Utilização de aeronaves remotamente pilotadas para extração de mosaico georreferenciado multiespectral e modelo digital de elevação de altíssima resolução espacial. In: **XVI Simpósio Brasileiro de**

Sensoriamento Remoto – SBSR, Foz do Iguaçu - PR, Brasil: Anais, 2013. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p1264.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2016.

SILVA, W. F; SILVA, L. S; MALTA, E. A; GONDIM, R. O; SCHERER-WARREN, M. Avaliação de uso de Veículo Aéreo não Tripulado – VANT em atividades de fiscalização da Agência Nacional de Águas. In : **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. SBSR**. João Pessoa-PB, Brasil: Anais, 2015.

SILVA, J. A; CALOU, V. B. C; TEIXEIRA, A. S; ALBIERO, D. Controle estatístico de processo aplicado à GCP's em mapeamento aerofotogramétrico com uso de vant. In: **XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto -SBSR** Santos – SP, Brasil: Anais, 2017. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/marte2/2017/10.27.15.33>. Acesso em: 20 jun. 2018.

SUGIURA, R; NOGUCHI, N; ISHII, K. Technology for Vegetation Monitoring using an Unmanned Helicopter Remote-sensing. **Biosystems Engineering**, v. 90, n. 4, p. 369–379, 2005.

TRIMBLE R4. **Model 3 gnss receiver**.Version 4.80. Revision A. 2013. Disponível em: <https://www.manualslib.com/manual/828648/Trimble-Trimble-R8.html#manual>. Acesso em: 25 out. 2016.

3 CAPÍTULO II - Comparação entre modelos de elevação obtidos por dados SRTM e dados gerados por mapeamento aerofotogramétrico com uso de RPA para área com presença de vegetação e dunas no litoral cearense

RESUMO: É crescente a demanda por modelos digitais de elevação (MDE) que possam traduzir de forma fiel as superfícies. O objetivo desse capítulo foi fazer uma análise entre MDE obtido por dados SRTM, dados de GPS e MDE obtido por meio levantamento aerofotogramétrico com uso de RPA para área com presença de dunas e vegetação, localizada no litoral cearense. Foram realizados 12 vôos com um RPA e coletados pontos de controle usando um receptor geodésico GNSS com sistema RTK. Comparou-se dados SRTM com dados colhidos com GNSS, dados SRTM e MDE produzido a partir de dados levantados por RPA para áreas com presença de vegetação e com dunas móveis, além de ter sido comparado dado de MDE produzido com levantamento por RPA e dados de GNSS. Os dados SRTM apresentaram erros médios de 3,70m, 5,26m e 3,52m em relação aos dados de GNSS, MDE obtido por meio de RPA para área com vegetação e MDE obtido por meio de RPA para área de dunas móveis, respectivamente. O MDE obtido com base em levantamento aerofotogramétrico por meio do uso de RPA apresentou melhor qualidade em termos de enquadramento no PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) quando comparado com dados SRTM, atendendo a escala na classe A a partir de 1:5.000 e classe B na escala a partir de 1:1.000. O melhor enquadramento que o SRTM apresentou em relação ao PEC para classe A foi para escala 1:10.000, sendo que, na escala de 1:1.000, o referido MDE pode ser classificado na classe C. Os erros que descrevem as diferenças altimétricas entre dados de MDE obtidos por meio de levantamento aerofotogramétrico com RPA e dados de GPS estão sob controle, indicando que as variações de erros existentes são inerentes ao processo e que esses erros estão controlados. Pelas análises realizadas foi possível identificar movimentação de dunas entre os períodos da passagem do SRTM e a coleta de informações com GPS e RPA, indicando potencialidade da integração dessas tecnologias para o monitoramento de áreas costeiras.

Palavras-chave: Qualidade, SRTM, RPA's, Padrão de exatidão cartográfica.

3.1 INTRODUÇÃO

A topografia, principalmente em sua forma mais atual, que ligou a produção de dados topográficos à aquisição de dados com embasamento na geodésia, é fundamental no entendimento de diversos fatores associados à dinâmica hidrológica e ambiental das superfícies. Porém, sua determinação é onerosa, tanto economicamente quanto temporalmente, tendo ainda que considerar a dinâmica das transformações ambientais que alteram continuamente a superfície terrestre (COSTA *et al.*, 2010).

Nesse contexto, é crescente a demanda por Modelos Digitais de Elevação (MDE) e atributos morfométricos derivados, para representação contínua do terreno em formato digital, largamente usada em análise da paisagem e em muitas outras aplicações modernas (PINHEIRO *et al.*, 2012).

De uma forma geral, a geração de um MDE tem sido facilitada a partir da disponibilização dos dados do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), gerados pelo projeto cooperativo entre a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), NGA (*National Geospatial Intelligence Agency*), DLR (*German Aerospace Center*) e ASI (*Advanced Study Institutes* da OTAN) (BIAS *et al.*, 2010). Ainda segundo Bias (2010), esses dados foram obtidos a partir de uma antena modificada especialmente para atuar no Ônibus Espacial Endeavour, durante uma missão de 11 dias em fevereiro de 2000.

O uso de dados SRTM tem se tornado cada vez mais freqüente em estudos geológicos, hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos, dentre outros, em particular para análises tanto quantitativas como qualitativas do relevo e seus agentes modificadores (CARVALHO; LATRUBESSE, 2004), em especial na elaboração de mapas hipsométricos e clinográficos (declividade) e de perfis topográficos, dentre outros produtos elaborados a partir de variáveis relacionadas à topografia (CARVALHO; BAYER, 2008).

Contudo, a acurácia do MDE e dos atributos topográficos derivados depende da qualidade e densidade dos dados primários, da estrutura dos dados (matricial, vetorial), da resolução espacial, da complexidade topográfica da área e dos algoritmos utilizados na interpolação (THOMPSON *et al.*, 2001). Modelos digitais oriundos do SRTM podem apresentar erros, atribuídos a ruídos na aquisição e transferência dos dados, à geometria da órbita, presença de vegetação densa, entre outros. Além disso, os MDEs também podem ser influenciados pelas características do terreno e comumente apresentam qualidade superior em áreas de relevo pouco movimentado e de declive suave, com pouca presença de vegetação (PINHEIRO *et al.*, 2012).

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de demonstrar as aplicações dos dados SRTM. Oliveira; Paradella (2008), avaliando a potencializada de geração de dados altimétricos para mapeamento topográfico a partir dos dados RADARSAT-1, SRTM e ASTER na Serra de Carajás (relevo montanhoso) e Floresta Nacional de Tapajós (relevo plano), concluíram que, para o relevo plano, a precisão altimétrica do DEM do SRTM e do RADARSAT-1 atendiam ao PEC definido para a escala 1:100.000. Porém, para o relevo montanhoso, apenas o SRTM e ASTER atendiam aos padrões exigidos.

Segundo Barros *et al.* (2005), dos dados SRTM, que o uso da interferometria para o cálculo da altitude apresenta maior acurácia, se comparada com a técnica tradicional da estereoscopia. Esses mesmos autores chamam a atenção dos usuários quanto ao uso dos dados SRTM, indicando que os mesmos não devem ser efetuados de maneira indiscriminada, em razão das imperfeições por eles apresentadas em trabalhos que exigem precisão e rigor altimétrico.

Outra potencial fonte de dados que tem se apresentado crescente para mapeamentos topográficos rápidos é a utilização de RPA's (Remote Piloted Aircraft System). Dentre as áreas que estão fazendo uso da técnica destacam-se: monitoramento e gestão dos recursos naturais (HORCHER; VISSER, 2004), monitoramento da vegetação (SUGIURA *et al.*, 2005), agricultura de precisão (REIDELSTUERZ *et al.*, 2007), mapeamento de sítios arqueológicos (BENDEA *et al.*, 2007; PATIAS *et al.*, 2007), mineração e fiscalização (ROCK *et al.*, 2011), segurança e meio ambiente (ROIG *et al.*, 2013), cartografia e topografia (REMONDINO *et al.*, 2011).

Segundo Rock *et al.* (2011), sua ampla utilização deve-se a facilidade de adaptação às necessidades de cada projeto, uma vez que as características das imagens estão diretamente relacionadas a parâmetros como resoluções, escalas e tipos de sensores, que são escolhidos de acordo com a necessidade de cada trabalho, além de permitirem a coleta de dados com alta resolução espacial e temporal.

Parte do sucesso da aplicação de RPA's em projetos diversos deve-se principalmente à evolução dos softwares, que possibilitaram produzir nuvens densas de pontos 3D e modelos MDSs a partir de imagens obtidas por câmeras embarcadas em RPA's, baseada, geralmente, no algoritmo SfM (*structure from motion*), que usa abordagem combinada para encontrar padrões de correspondência nas imagens. O SfM foi desenvolvido em campo de visão computacional para a geração automática de modelos 3D a partir de conjuntos de dados não ordenados (REMONDINO *et al.*, 2014).

Em softwares de processamento de imagens de RPA's, como Pix4DMapper,

PhotoScan, APS, entre outros, todo o processamento, desde a orientação interna, correspondência automática entre todas as imagens que tenham alguma sobreposição, ajustamento simultâneo de feixes em bloco e geração dos produtos, como nuvem de pontos, MDE e ortomosaico, entre outros, são realizados automaticamente (OIKONOMOU *et al.*, 2015). Contudo, considerando a evolução dos softwares que fazem o processamento digital de imagens e geração de produtos de forma automática, torna-se necessário conhecer a qualidade com que tais algoritmos chegam a esses produtos (REMONDINO *et al.*, 2008).

Nesse contexto, com as possibilidades de obtenção e aplicação de dados topográficos tendo sido grandemente ampliadas com avanço das tecnologias espaciais (sensores orbitais), da robótica (RPA's, Scanner, etc.) e da engenharia da computação (hardware e software), as investigações de precisão nesse campo têm sido realizadas sobre a geração e comparação de MDEs (REMONDINO *et al.*, 2014), obtidos a partir de métodos diferentes, com o objetivo de identificar a melhor solução para cada caso. Quando se trata de uso de RPA, quando se deseja obter bons resultados métricos em termos de precisão para projetos que usam imagens digitais, torna-se necessário o uso de GCPs (*Ground Control Points*) (REMONDINO *et al.*, 2008). Aqui, os pontos de controle são uma importante fonte de dados para correção geométrica (REMONDINO *et al.*, 2014).

Naturalmente, os processos apresentam variações que podem ser monitoradas. Uma forma eficiente de entender essas variações inerentes ao processo pode ser feita usando Controle Estatístico de Processos (CEP). Segundo Montgomery (2004), o CEP compreende a um conjunto de técnicas estatísticas que são usados para monitorar e melhorar os processos. Portanto, a essência do CEP é monitorar a variação inerente dos processos, denominada de variação natural, e distingui-las das causas especiais, que em geral são identificáveis.

Nesse contexto, o CEP apresenta-se como uma importante ferramenta de análise de dados, com possibilidades de aplicações no campo da análise de métodos e produtos topográficos/cartográficos, campo este que muito pouco têm explorado essa importante ferramenta de análise de comportamento de dados, uma vez que não são encontrados trabalhos de análise da qualidade em produtos de topografia, cartografia ou produtos de RPA's, usando o CEP como ferramenta no processo de entendimento dos erros desses produtos.

No Brasil, as análises realizadas em produtos cartográficos têm como base a aplicação do Padrão de Exatidão Cartográfico, definido pelo Decreto 89.817 de 20 de Julho de 1984, que incluem o cálculo do erro médio quadrático (EMQ) e da tolerância vertical. Para que um produto cartográfico digital possa ser aceito no Sistema Cartográfico Nacional - SCN

noventa por cento (90% ou $1,6449 \cdot EP$) dos pontos coletados no produto cartográfico quando comparados com fonte de maior exatidão devem apresentar erros iguais ou inferiores aos previstos ao PEC-PCD – Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos da Cartografia Digital (CONCAR, 2011; MICELI *et al.*, 2011).

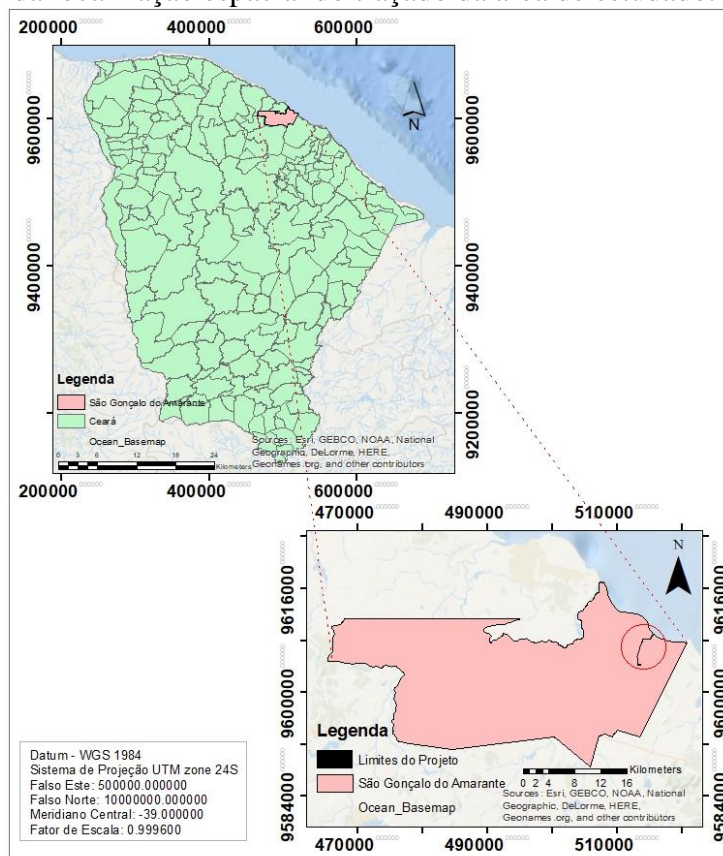
Dessa forma, o objetivo desse capítulo foi fazer uma análise entre MDE obtido por dados SRTM, dados de GPS e MDE obtido por meio do uso de RPA, para uma área com presença de dunas e vegetação, localizada no litoral cearense, e identificar a qualidade do método testado através do uso do CEP e o PEC.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Localização da Área de Estudo

O trabalho foi conduzido em uma área de 137,8 ha, no entorno do Complexo Industrial e Portuário do Pecém-CIPP, localizado no município de São Gonçalo do Amarante-CE, em novembro de 2015 (Figura 19).

Figura 19. Detalhe da localização espacial do traçado da área de estudado.



Fonte: Autor, (2018).

De acordo com Nogueira *et al.* (2005), a vegetação local do complexo portuário apresenta predomínio do complexo vegetacional da zona litorânea, que abrange as unidades fitoecológicas: a) vegetação pioneira psamófila, presente na planície litorânea e, muitas vezes, na área de dunas móveis e fixas; b) floresta a retaguarda das dunas, com espécies vegetais que ocorrem nas serras úmidas, serras secas e na caatinga arbórea; e c) vegetação dos tabuleiros litorâneos, sendo a maior diversificação vegetacional e florística, podendo ser encontrada mata de tabuleiro, o cerrado e a caatinga. Segundo os mesmos autores, duas importantes unidades de conservação estão presentes na área, sendo uma o Lagamar do Cauípe, designado como uma unidade de uso sustentável sendo assim uma área de proteção ambiental (APA) e a Estação Ecológica do Pecém, caracterizada por unidade de proteção integral.

3.2.2 Dados de MDE do SRTM

Os dados do SRTM são disponibilizado gratuitamente a partir do servidor de FTP do USGS (<ftp://edcsgs9.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/>). O arquivo SRTM usado neste trabalho, que contempla a área de estudo, apresenta nomenclatura original s04_w039_1arc_v3, com resolução espacial apresentando grade de 1 arco-segundo por 1 arco-segundo (30 m x 30 m).

De acordo com Santos *et al.* (2006), os dados SRTM, disponibilizados para a América do Sul são organizados no formato de 1° por 1° e identificados pelas coordenadas latitude e longitude do canto inferior esquerdo (sudoeste) e as elevações são representadas em metros sem casas decimais. Cada arquivo contém 1201 linhas e 1201 colunas e as linhas e colunas das extremidades dos modelos sobrepõem-se e são idênticas às linhas e colunas das extremidades dos modelos adjacentes.

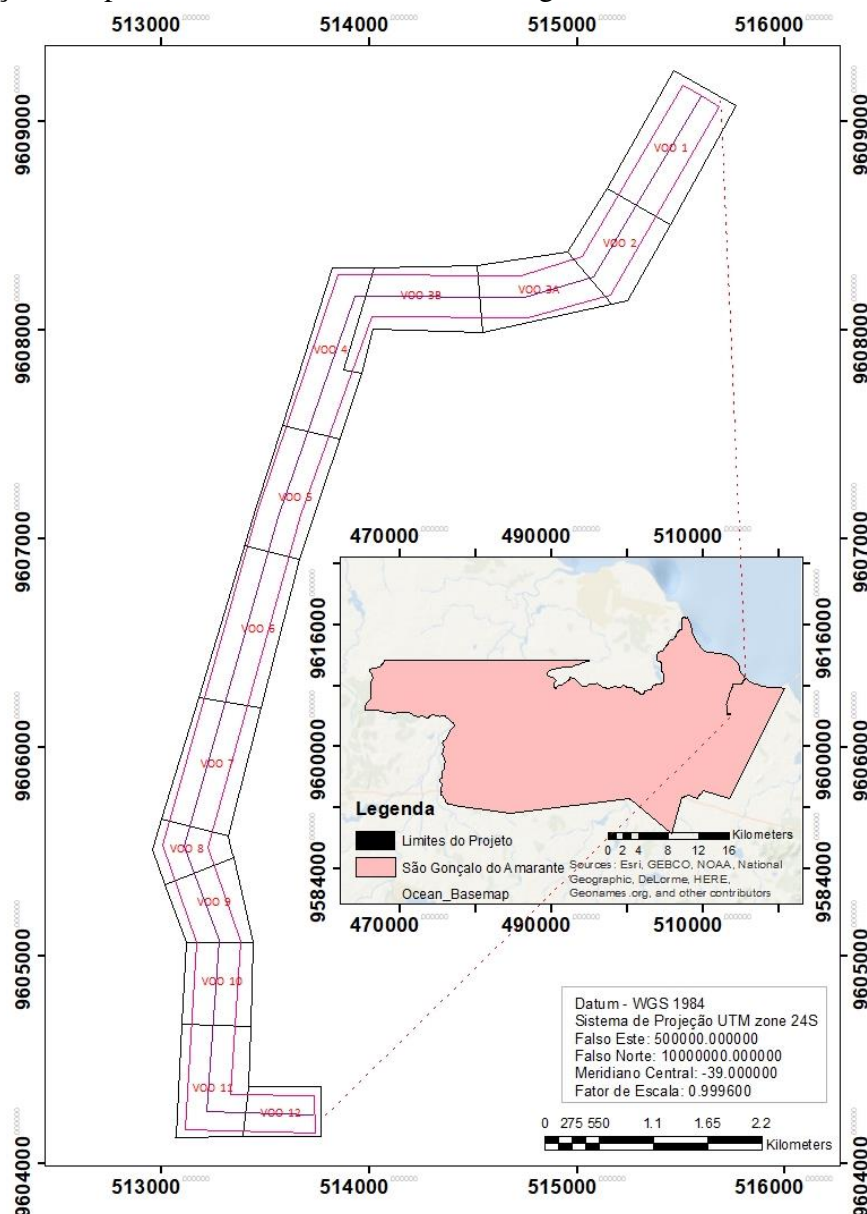
O método de aquisição dos dados altimétricos SRTM foi baseado na interferometria, que consiste na comparação de duas imagens de radar tomadas de pontos ligeiramente diferentes para obter elevação ou informação de mudanças na superfície. Para realizar este procedimento a nave espacial *Endeavour* foi equipada com um mastro (antena) de 60 metros, instaladas no compartimento de carga da nave e na ponta do mastro que se estendia para fora da espaçonave. O referencial altimétrico do SRTM é o elipsóide WGS84, em que o modelo terrestre é representado pelo *Earth Geopotential Model* 1996 (EGM96).

3.2.3 Levantamento Aerofotogramétrico com uso de RPA

O voo aerofotogramétrico foi conduzido para uma faixa estreita de terreno que parte da Lina de quebrada da maré em direção ao continente, com largura e comprimento

aproximados de 200m e 7.000m, respectivamente. Para o imageamento de toda a área do traçado, foram realizadas 12 missões (Figura 20), com vãos realizados a 100 metros de altura, usando o aplicativo para voo programado Litchi, com VANT Inspire 1, Drone da marca Dji, tendo a bordo a câmera ZENMUZE X3, de 12 MP, distância focal de 3,6 mm, largura 4.000 pixels, altura 3.000 pixels, largura do sensor 6,17 mm e altura do sensor 4,628 mm. O uso dessa quantidade de vãos está relacionado à baixa autonomia de voo do VANT utilizado no trabalho.

Figura 20. Detalhe da localização espacial do trabalho e configuração geral dos planos de voos para traçado mapeado com levantamento aerofotogramétrico com uso de RPA.



Fonte: Autor, (2018).

A velocidade adotada para o voo foi de 28 km/h, com uma taxa de coleta de

imagens a cada 2 segundos, com sobreposição frontal calculada de 85% e lateral de 70%, produzindo, portanto, 5 faixas de vôo por missão no alinhamento do traçado, com aproximadamente 3.000 imagens capturadas e usadas no processamento. O GSD, do inglês *Ground Sampling Distance* (cm/pixel) foi calculado pela seguinte expressão (Pix4D, 2016):

$$\text{GSD (cm/pixel)} = \frac{S_w * H * 100}{Imw * Fr} \quad (3.1)$$

Em que:

S_w é a largura do sensor (mm);

Imw é a largura da imagem (pixel);

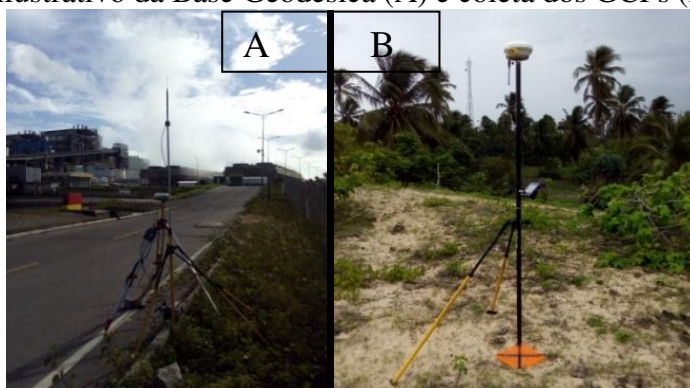
Fr é a distância focal (mm); e

H a altura de vôo (m).

3.2.4 Coleta de Pontos de Controle de Solo (GCP's)

Foram coletados 67 pontos de controles (GCPs), aleatoriamente distribuídos, usando um GPS Geodésico RTK da marca TRIMBLE, modelo R4, com Base instalada em um marco geodésico anteriormente implantado, usando o mesmo equipamento (Figura 21A). Esses pontos de controle foram usados tanto para georreferenciar o projeto aerofotogramétrico, servindo, portanto de base para geração do MDE obtido por meio processamento digital das imagens de RPA, como na comparação direta com o SRTM.

Figura 21. Detalhe ilustrativo da Base Geodésica (A) e coleta dos GCPs (B).



Fonte: Autor, (2018).

O conjunto RTK faz a determinação das coordenadas planialtimétricas através do

rastreio de satélites pertencentes ao sistema GNSS, com a utilização do Receptor base com 72 canais paralelos e tecnologia R-Track para rastreamento dos sinais L1/CA e L2, com suporte para GLONASS L1 e L2, rádio base UHF TRIMBLE HPB450, com 14 canais selecionáveis e Receptor Rover GNSS com antena e rádio UHF integrados em uma única peça, com 72 canais paralelos e tecnologia R-Track para rastreamento dos sinais L1 e L2 com suporte para WASS e EGNOS, GLONASS L1/CA e L2 e Coletor de dados Trimble TSC2 (TRIMBLE, 2013).

O sistema RTK usado na coleta dos pontos apresenta precisão de 3 mm + 0.1 ppm RMS na horizontal e 3,5 mm + 0,4 ppm RMS na vertical (TRIMBLE, 2013). Para diminuir os erros da etapa manual do processo, que é a inserção dos GCPs na etapa de processamento, foram usadas placas de acrílico medindo 0,30m x 0,30m de cor laranja, com um centro marcado em cruz com fita medindo 1,7 cm de largura (Figura 21B). O projeto foi desenvolvido tendo como base o Datum WGS84, com cotas ortométricas e usando o plano de projeção UTM (*Universal Transversa de Mercator*), zona 24S. Para padronização da referência altimétrica, a altitude elipsoidal obtida por GPS foi compatibilizada usando o modelo de ondulação geoidal (EGM96) do Datum WGS84.

3.2.5 Processamento e análise dos dados

O processamento das imagens oriundas do levantamento aerofotogramétrico com uso de RPA, que envolve a geração de mosaico, nuvem densa de pontos e posterior geração de MDE da área mapeada, com resolução espacial de 1m x 1m, foi feito usando o software Pix4D Mapper Pro, com licença pertencente ao Grupo CADIC BRASIL. Este software, por ter uma interface bastante amigável e apresentar bons resultados em termos de qualidade indicada por vários trabalhos na linha, é hoje, umas das principais plataformas usadas no processamento digital de imagens adquiridas com RPA em todo o mundo (REMONDINO *et al.*, 2014).

Para avaliação das variações de altitude entre os dados SRTM, o MDE obtido através de dados de aerolevantamento com RPA e os pontos de controles (GCPs), ou seja, erros altimétricos, utilizou-se o enquadramento em relação ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) para análise da acurácia dos dados.

A análise do EMQ descreve a acurácia vertical de um MDE (Eq. 3.2), englobando erros aleatórios e sistemáticos introduzidos durante a produção dos dados (MILIARESIS & PARASCHOU, 2005). Os parâmetros estatísticos de avaliação considerados foram: média, desvio padrão das variações, Erro Médio Quadrático (EMQ) e Erro padrão.

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum (h - h')^2}{n}} \quad (3.2)$$

Em que:

EMQ = erro médio quadrático;

h = altitude dos dados SRTM (m);

h' = altitude da base de dados referencial (m);

n = tamanho da amostra.

Segundo Banzatto & Kronka (2006), para avaliação altimétrica, o erro padrão (Eq. 3.3) dá uma idéia da precisão com que foi estimada a média da amostra. Quanto menor for o erro padrão da média, melhor será a estimativa da média.

$$\text{Erro}_{\text{padrao}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

Onde:

σ = desvio padrão dos erros (m); e

n = tamanho da amostra.

Para que um produto digital possa ser aceito como produto de referência do SCN (Sistema Cartográfico Nacional), e conseqüentemente para a INDE (Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais), a Norma para Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais de Defesa da Força Terrestre do Exército Brasileiro, estabelece que noventa por cento (90% ou $1,6449 \cdot EP$) dos erros dos pontos coletados no produto cartográfico, quando comparados com as suas coordenadas levantadas em campo por método de alta precisão, receptor GNSS Geodésico, por exemplo, devem apresentar os valores iguais ou inferiores aos previstos ao PEC-PCD, devendo ainda apresentar os valores de Erro Padrão (EP) também iguais, ou inferiores, aos previstos nas tabelas deste tópico.

O Quadro 1 traz o que preconiza o PEC-PCD para os Modelos Digitais de Elevação (MDE), ou seja, de Terreno (MDT) ou de Superfície (MDS), e para os Pontos Cotados. Os valores previstos para a classe “A” (PEC-PCD) foram definidos a partir de adaptações dos estudos realizados por Merchant (1982) e ASPRS (1989), nos quais o PEC-

$PCD = 0,27 * (\text{Equidistância do produto cartográfico})$ e $EP = 1/6 * (\text{Equidistância do produto cartográfico})$. As classes “B”, “C” e “D” do PEC-PCD correspondem, em ordem, às classes “A”, “B”, “C” do PEC Altimétrico previstas no Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984 (BRASIL, 2016).

Quadro 1. Padrão de Exatidão Cartográfica altimétrica dos pontos cotados e do MDT (Modelo Digital do Terreno), MDE (Modelo Digital de Elevação) ou MDS (Modelo Digital de Superfície) para produção de dados cartográficos digitais.

PEC-PCD (3)	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84	2,70	1,67	5,50	3,33	13,70	8,33	27,00	16,67
B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,66	25,00	16,66	50,00	33,33
C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00

Fonte: Norma da especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais de defesa da força terrestre. ET-ADGV-Defesa F Ter 1 a Parte 2ª Edição 2016 (Versão 1.1 – Março 2016).

Salienta-se que, em função da área de estudo apresentar-se uma parte em ambiente de dunas móveis e outra parte em ambiente com vegetação característica de regiões costeiras, com vegetação presente tanto no momento da passagem do SRTM (observado em imagens de satélite da época) como no momento da coleta de dados pelo VANT, optou-se por incluir análises dessas feições conjuntas e em separado, com o objetivo de medir a influência da vegetação no método de coleta de dados.

Além da avaliação com base nos modelos estatísticos descritos acima, também foi feita a comparação entre os MDEs através da análise espacial da declividade em função de perfis e curvas de níveis, além do estudo das variações inerentes ao conjunto de dados através da confecção de cartas de controle. Essa medida foi conduzida considerando uma análise que possa ir além das referências pontuais obtidas na comparação dos MDEs em pontos específicos.

Os processos envolvendo análise dos MDEs foram feitos usando ferramentas como os Softwares Global Mapper 15 e ArcMap 9.1, com licenças pertencentes ao Laboratório de Informática do CCA da Universidade Federal do Ceará. A análise estatística, a confecção de gráficos e cartas de controles foi feita usando planilhas inteligentes e o software Minitab 16, com licença pertencente ao LIMA (Laboratório de Investigação de Acidentes com Máquinas Agrícolas) da Universidade Federal do Ceará.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

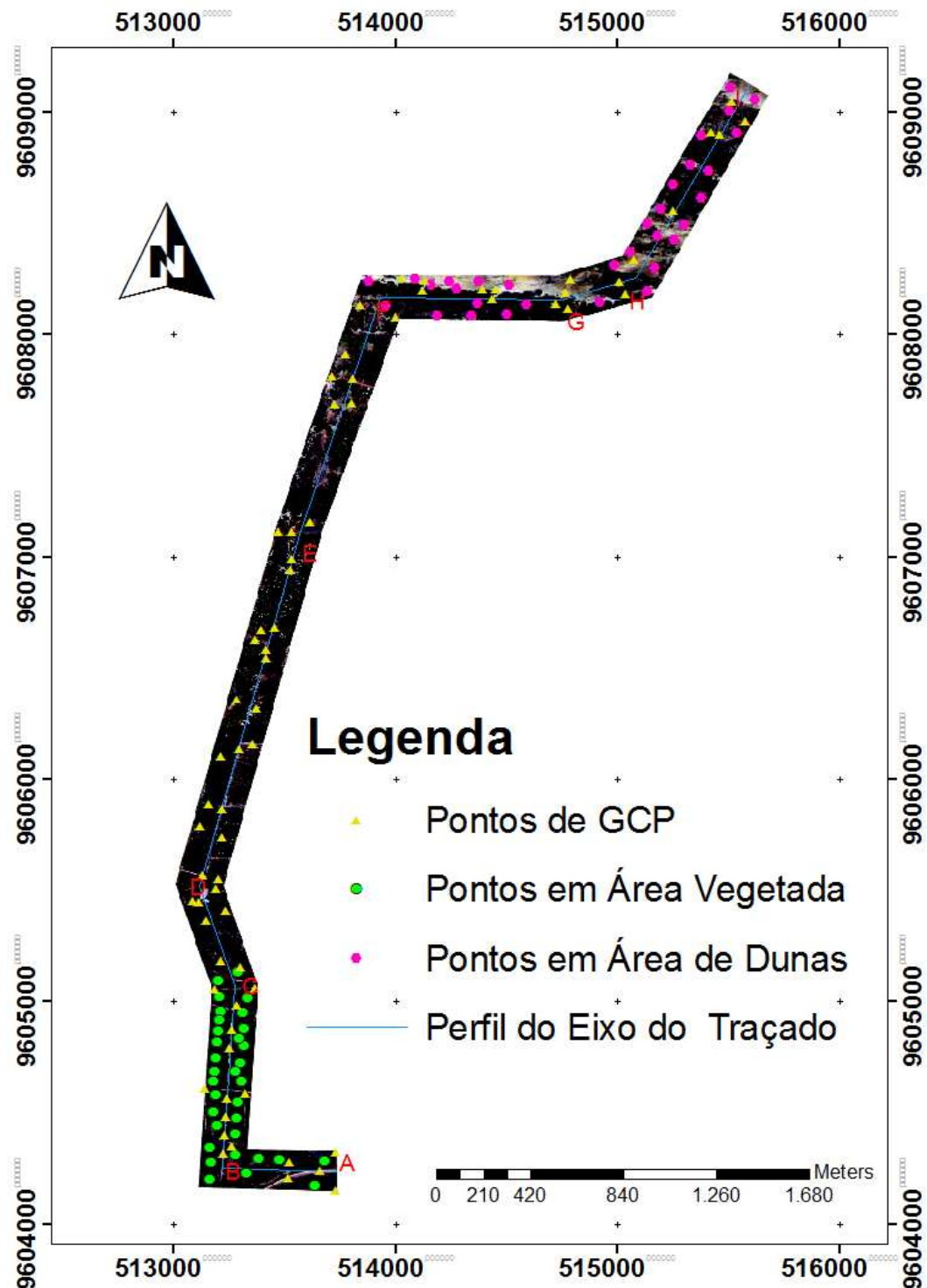
3.3.1 Enquadramento segundo Padrão de Exatidão Cartográfica

Ao analisar primariamente os dados de variações de altitudes entre as elevações SRTM e os dados de altitudes obtidas por receptor GNSS Geodésico com sistema RTK (GCPs), pontos estes usados também como pontos de controle para geração do mosaico, nuvem densa de pontos e MDE no trabalho de aerolevantamento fotogramétrico com uso de RPA, observou-se que nas áreas mais próximas ao mar, onde observava-se a presença de dunas que poderiam ser móveis, havia pontos que apresentavam variação negativa, em relação às cotas obtidas com dados SRTM, fato não ocorrido em outras áreas do traçado estudado.

Essa observação trouxe curiosidade e resolveu-se fazer uma análise que pudesse descrever de forma mais clara esse fenômeno. Dessa forma, além da comparação entre os dados SRTM e os dados colhidos com receptor GNSS (SRTMxGPS) para todo o traçado em estudo, fez-se a separação de um conjunto de dados baseados nas diferenças pontuais entre os MDE SRTM e MDE obtidos pelo uso do RPA para a faixa de praia (SRTMxMDE RPA/ÁREA DE DUNAS), que apresenta dunas móveis, e outro conjunto de dados para área que apresenta vegetação característica de regiões costeiras (SRTMxMDE RPA/ÁREA VEGETADA).

A Figura 22 traz a distribuição espacial dos pontos de GPS para todo o traçado, a distribuição dos pontos analisados para área de dunas (SRTM x MDE RPA/ÁREA DE DUNAS) e com vegetação (SRTM x MDE RPA/ÁREA VEGETADA) e o perfil do alinhamento central do traçado. Pela análise da referida figura é possível observar que a área intermediária do traçado (que vai do ponto C ao ponto F do traçado) apresenta apenas pontos de GCP's, pois trata-se de uma faixa de transição, bastante antropizada, entre a área com presença de dunas e a área mais ao sul, com maior aporte de vegetação.

Figura 22. Ortofoto do traçado com a distribuição espacial dos pontos de GPS para todo o traçado, distribuição dos pontos analisados para área de dunas (SRTM x MDE RPA/ÁREA DE DUNAS), com vegetação (SRTM x MDE RPA/ÁREA VEGETADA) e o perfil do alinhamento central.



Fonte: Autor (2018).

Dessa forma, a Tabela 9 exibe os resultados estatísticos apresentados para os dados de variações entre o SRTM e os pontos de GCP's para todo o traçado (SRTM x GCPs), o SRTM e o MDE obtidos por RPA na área com maior aporte de vegetação (SRTM x MDE RPA/ÁREA VEGETADA), SRTM e MDE obtido por RPA para área com presença de dunas (SRTM x MDE RPA/ÁREA DE DUNAS) e dados para a diferença entre o MDE obtido por

meio do levantamento aerofotogramétrico com uso de RPA e pontos de GPS (MDE RPA x GPS).

Tabela 9. Enquadramento no PEC e dados estatísticos para diferenças entre SRTM e dados de GPS (SRTM x GCPs), SRMT e MDE obtido por RPA para área maior aporte de vegetação (SRTM x MDE RPA/ÁREA VEGETADA) e área de com dunas (SRTM x MDE RPA/ÁREA DE DUNAS) e MDE produzido por RPA e dados de GPS (MDE RPA x GPS).

Variações	PEC	EMQ	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão (EP)	Mín.	Máx.	N
SRTM x GCPs	0,59	4,70	3,70	2,93	0,36	-4,60	12,16	67
SRTM x MDE RPA/ÁREA VEGETADA	0,58	5,63	5,26	2,04	0,35	2,52	10,08	33
SRTM x MDE RPA/ÁREA DE DUNAS	1,13	5,21	3,52	3,91	0,69	-4,46	13,96	32
MDE RPA x GPS	0,31	0,40	0,17	0,67	0,19	-0,90	1,09	11

PEC=Padrão de Exatidão Cartográfico; EMQ=Erro Quadrado Média; EP=Erro Padrão; Mín.=Mínimo; Máx.=Máximo; e N=Tamanho da amostras.

Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela acima mostra ainda o enquadramento dos erros avaliados segundo o critério de atendimento ao PEC através do EP e o resumo estatístico dos dados. Segundo critérios da Norma da Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais de Defesa da Força Terrestre, (EB80-N-72.003) – 1ª Parte – 2ª Edição, publicado no Boletim do Exército nº 18, de 6 de maio de 2016, os dados que comparam SRTM e pontos de GPS (SRTM x GCPs) atingiu um PEC de 0,59, os dados que comparam SRTM com MDE obtido por RPA para área com maior aporte de vegetação (SRTM x MDE RPA/ÁREA VEGETADA) obteve PEC 0,58, a comparação do SRTM com MDE obtido por RPA para área de dunas (SRTM x MDE RPA/ÁREA DE DUNAS) obteve PEC de 1,13 e a comparação entre dados de MDE obtido por RPA e dados de GPS (MDE RPA x GPS) um PEC de 0,31.

De uma forma geral, os erros relacionados à variação de altitudes dos dados SRTM em relação aos dados de GPS e aos dados de MDE obtidos por meio de RPA foram bastantes baixos quando comparados com dados da literatura. Observa-se, pela análise da tabela, que o EQM e a média foram maiores para área com maior aporte de vegetação (SRTMxMDE RPA/ÁREA VEGETADA). Porém, o desvio padrão e o erro padrão para essa variável foi o que apresentou menores valores em relação às demais, mostrando menor variação nos dados, evidenciada também pela menor variação entre os valores máximo e

mínimo das amostras da área com maior carga de vegetação.

O melhor enquadramento em relação ao PEC foi para o MDE obtido a partir de dados levantados por RPA, que permitiu classificação na classe A para escala a partir de 1:5.000 e classe B para escala a partir de 1:1.000. As demais variáveis só permitem classificação na classe A para escala a partir de 1:10.000.

A maior variação em termos de valores extremos de máximo e mínimo ocorreu para a área com presença de dunas (SRTM x MDE RPA/ÁREA DE DUNA). Esse comportamento fica evidenciado quando analisado o erro padrão e desvio padrão, que se mostraram maiores do que nos dados que estuda a diferença do SRTM em relação aos GCPs (SRTM x GCPs) e do SRTM em relação à área com maior presença de vegetação (SRTM x MDE RPA/ÁREA VEGETADA). Além disso, a presença de valores negativos na diferença de dados de elevação SRTM e MDE obtido por meio de RPA para área de dunas pode evidenciar que ocorreu movimentação das dunas, uma vez que essa região da área estudada apresenta dunas com pouca ou nenhuma cobertura vegetal.

Quando se analisa os dados estatísticos da diferença entre SRTM e pontos de GPS (SRTM x GCPs), observa-se que também há a presença de valores negativos como valor mínimo. De acordo com a análise nos mapas da distribuição dos pontos em campo, ficou evidenciado que esses valores estão distribuídos na região do traçado com a presença de dunas e/ou em regiões do traçado que sofreram mudanças antrópicas na topografia após a passagem do SRTM.

Embora tenha sido obtido com número amostral pequeno, de apenas 11 dados (vale ressaltar que esses 11 dados foram usados exclusivamente para validação do MDE obtido por dados primários adquiridos com RPA), o melhor enquadramento dos dados de MDE obtidos por meio de levantamento com uso de RPA indica que esse método de mapeamento pode ser uma alternativa viável para levantamento de dados e geração de produtos cartográficos. Esse trabalho corrobora com levantamento e comparação entre as coordenadas amostradas em ortoimagem e em campo por Vitti *et al.* (2017), que analisando acurácia horizontal do mapeamento de um trecho da área de concessão da UHE de Bariri, SP com imagens de alta resolução coletadas com RPAS, observou enquadramento na PEC-PCD na escala 1:2000, classe B.

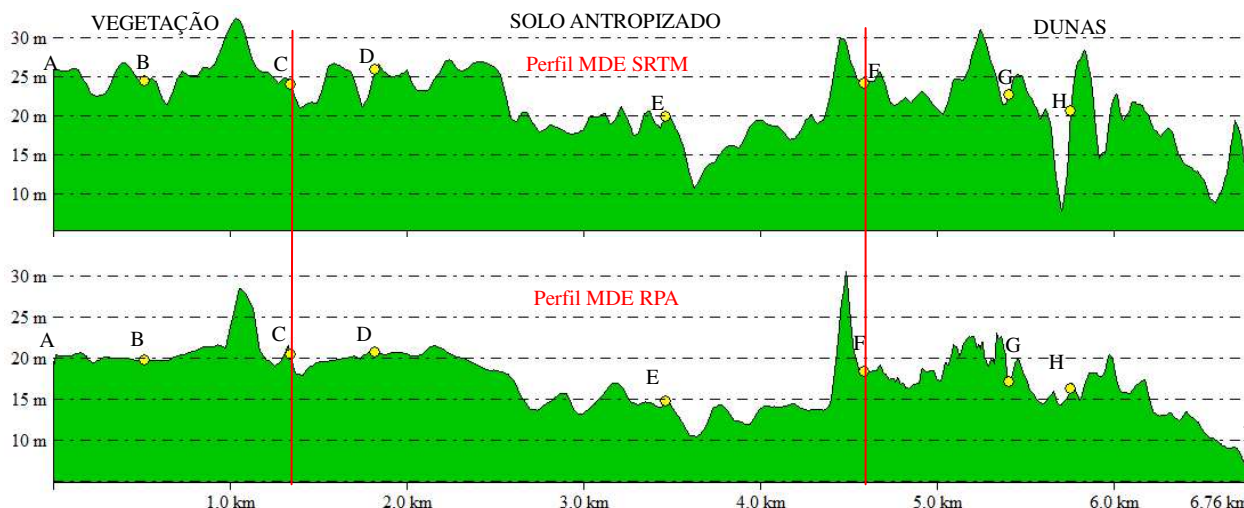
Vale salientar que esta classificação utilizou como parâmetros os novos critérios da Norma da Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais de Defesa da Força Terrestre, que usa critérios internacionais baseado nos valores utilizados pelo *Ordinance Survey* e *National Joint Utilities Group* do Reino Unido, extraídos de ARIZA

(2002), no qual Exatidão Cartográfica = 0,28 mm na escala do produto cartográfico e EP = 0,17 mm na escala do produto cartográfico. As classes A, B e C do antigo PEC estabelecido em 1984 equivalem às Classes B, C e D, respectivamente (se PEC = A, então PEC-PCD = Até “C”; Se PEC = B, então PEC-PCD = Até “D”; e Se PEC = Não disponível, então PEC-PCD = Não disponível) (BRASIL, 2016).

3.3.2 Análise Comparativa de Perfis

Buscando melhor compreensão dos dados em termos de variação espacial entre os dados altimétricos obtidos pelo MDE do SRTM e do MDE obtido por meio de RPA apresenta-se o perfil do alinhamento do traçado estudado (Figura 23). Pela figura é possível ver que, além de apresentar maiores valores de elevação para basicamente todo o traçado, o perfil obtido por dados do SRTM mostrou uma amplitude, em relação ao perfil obtido por meio de RPA para a faixa de eixo que vai do ponto A ao ponto E. Por observações feitas na condução do trabalho de campo, essas variações apresentadas pelos dados SRTM não são reais se considerado a topografia real do terreno do referido traçado, exceto se considerado a possível influência da vegetação nos resultados do MDE SRTM.

Figura 23. Perfis gerados a partir de dados de MDE SRTM e MDE obtido por aerolevantamento com uso de RPA.



Fonte: Autor (2018).

O perfil SRTM na faixa de vegetação apresenta duas grandes depressões A e C. Esse comportamento apresentado pelos dados de elevação SRTM pode estar relacionado com a influência da vegetação nessa faixa analisada, que, em campo, apresenta variação de alturas das copas, com densidade alta, apresentado ainda alguns pontos de clareiras com solo exposto. Outro fator que deve ser considerado é que existe uma distância temporal muito

grande entre a passagem do SRTM (anos 2000) e a realização deste trabalho, não sendo, portanto, descartada a possibilidade de modificações antrópicas na área.

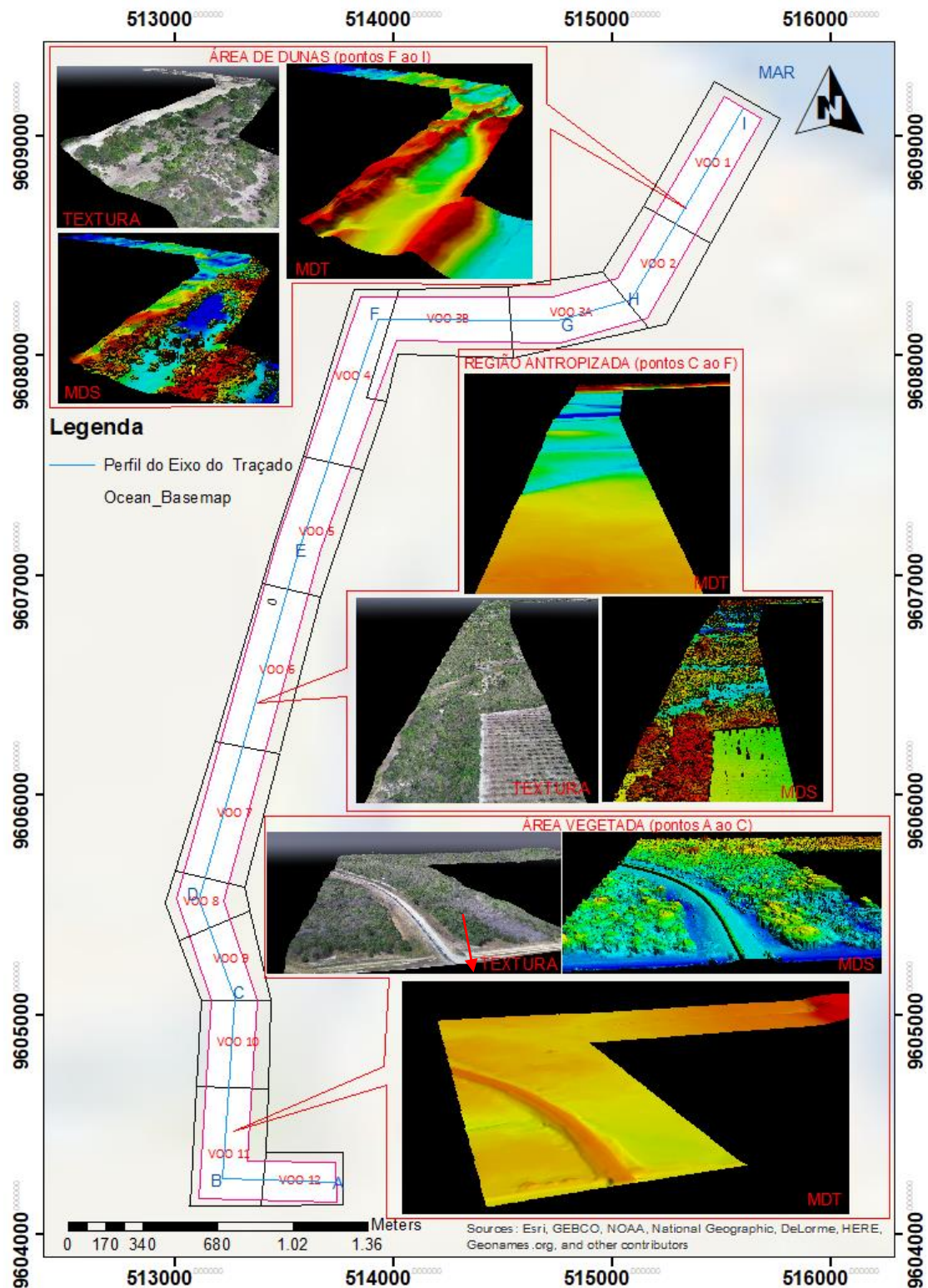
Além disso, por se tratar de um dado de banda C, o MDE gerado não é fiel à topografia pois sofre influência da vegetação. Dessa forma, em áreas com cobertura florestal, a altura do dossel é um importante fator a ser considerado na modelagem do relevo a partir de dados extraídos do SRTM (VALERIANO et al., 2005). Rao (2004), em experimentos de campo, encontrou erros menores que 5 metros na vertical e de 2 a 3 pixels na horizontal, o que chama a atenção para necessidade de validação também para a possibilidade de deslocamentos dos dados.

Com relação a área de dunas é possível observar-se uma grande variação nas elevações para os dois perfis (pontos entre F e I). Esse comportamento é esperado uma vez que se trata de uma faixa que apresenta dunas praticamente sem nenhuma cobertura vegetal, o que pode torná-las móveis no espaço e no tempo. A presença de pontos de grandes depressões apresentado pelo perfil com dados SRTM, mais evidentes entre os pontos G e I da Figura 23, depressões estas com valores nos dados de SRTM menores do que dados obtidos por GPS, corroboram com esse entendimento.

O perfil que teve origem nos dados de aerolevanteamento fotogramétrico com uso RPA é o dado que representa melhor a topografia da área na faixa do perfil em questão (A-E). Segundo o observado em campo e representado pelo perfil que teve origem nos dados levantados por RPA, essa faixa apresenta relevo suave na maior parte, principalmente do ponto A ao ponto C, com exceção de dois pontos próximos ao ponto C, bem representado pelo perfil obtido por RPA.

Na tentativa de entender melhor esses comportamentos, a Figura 24, mostra em perspectiva o traçado geral com os modelos de textura, MDS e MDT para a área de dunas, a área com vegetação e a área central do traçado, gerados a partir dos dados primários adquiridos com uso de RPA. Analisando a área entre os pontos A a C do traçado é possível observar a existência de estrutura construída, estrutura esta que compõe parte do complexo da Usina Termoelétrica do Pecém e que não existia no momento da passagem do SRTM, pois a usina foi construída depois dos anos 2000. Pela análise do modelo de textura é possível ver que a vegetação, onde existe, é baixa, porém bastante densa.

Figura 24. Representação gráfica em separado dos modelos de textura, MDS e MDT para os dados produzidos a partir de levantamento aerofotogramétrico com uso de RPA da área de estudo.



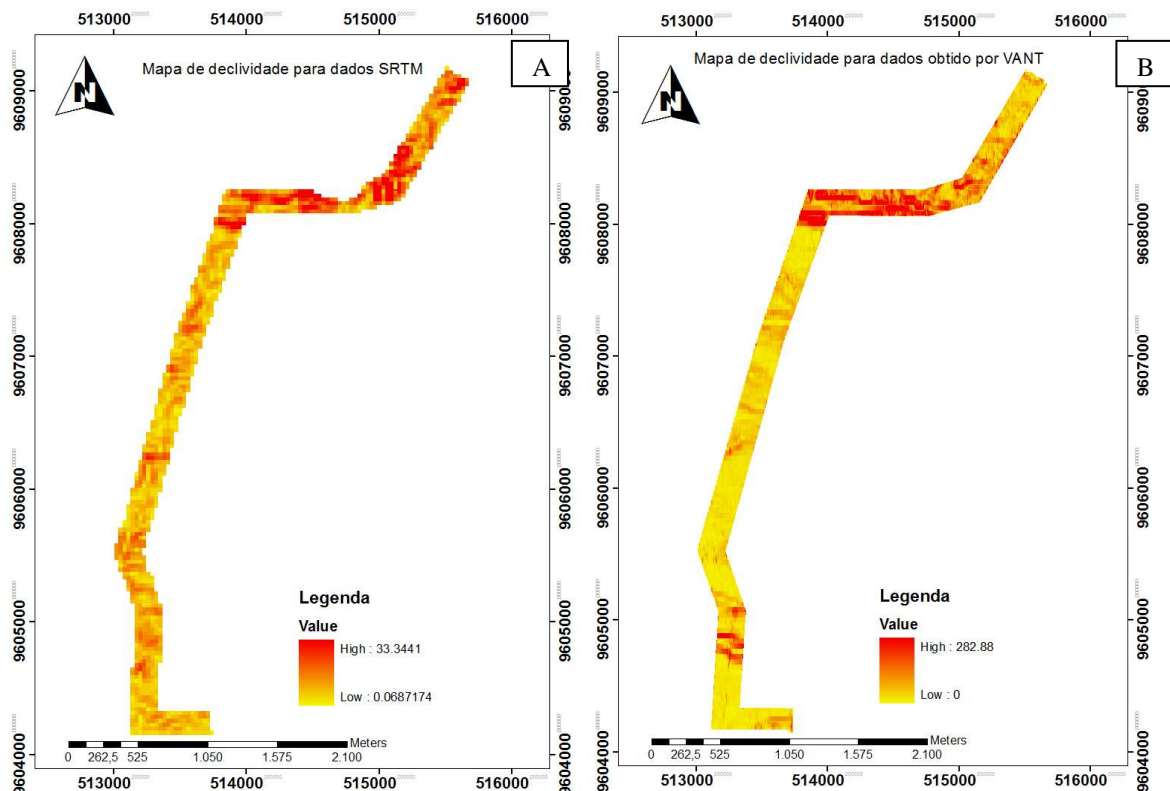
Fonte: Autor (2018).

Cabe colocar ainda que, se houver deslocamento horizontal dos dados SRTM em função de erros do modelo, como coloca Raos (2004), é possível que o perfil do SRTM não esteja exatamente condizente com o do RPA, o que poderia ter deslocado o eixo real e a depressão presente no dado SRTM entre os pontos A e B pode ser uma pressão mostrada na seta de cor vermelha da Figura 24.

Com relação à área com presença de dunas móveis o MDT em perspectiva dos dados gerados a partir de uso de RPA está mostrando grande variação do relevo, o que está sendo confirmado com o modelo de textura e MDS. Essa é uma região com grandes oscilações de perfil nos dados SRTM, que apresenta um pico próximo ao ponto H do eixo, que pode ser explicado por uma falha um grupo de pixels nessa região do SRTM, podendo ser observada na Figura 25A. O restante das variações pode estar relacionado à movimentação de dunas e ou mesmo fatores relacionados à qualidade planimétrica do SRTM, como já colocado.

A Figura 25 exibe os mapas de declividade relativa para a área de estudo. A variação na declividade em porcentagem foi muito maior nos dados produzidos por RPA do que nos dados de SRTM, com o primeiro chegando a até 282,9%, enquanto que o segundo não passou de 33,3%.

Figura 25. Mapa de declividade em porcentagem para dados SRTM (A) e MDE gerado a partir do uso de RPA (B).



Fonte: Autor (2018).

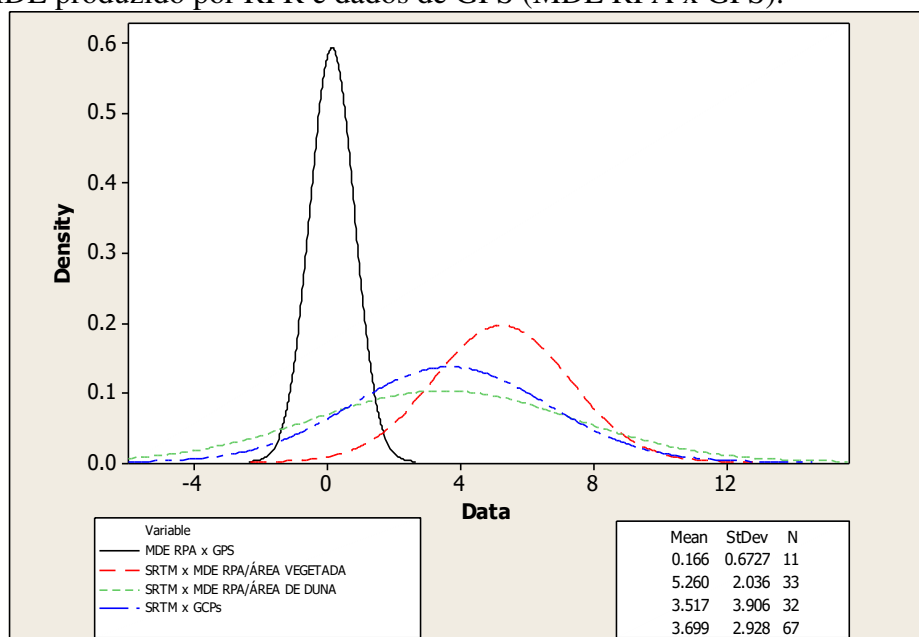
Os valores mínimos encontrados para os dados de declividade ficaram muito próximos para as duas fontes de dados, com 0,0 para dados obtidos por RPA e 6,87 para os dados de SRTM. Embora tenha mostrado valores extremos mais elevados, os dados produzidos por RPA apresentou média de 4,7130, menor do que 5,1394 produzida para os dados de declividade obtida para o SRTM. Já o desvio padrão foi de 6,2296 para os dados de

RPA e de 4,1592 para os dados com origem no SRTM. Essa maior variação nos dados de declividade produzidos por RPA pode ser explicada pelo menor tamanho do pixel, produzido com 1m x 1m, frente aos 30m x 30m dos dados SRTM.

3.3.3 Cartas de Controle para Variações na Altimetria

A fim de melhorar o entendimento do comportamento das variáveis estudadas, apresenta-se, a seguir, o histograma e as cartas de controle para as referidas variáveis. A Figura 26 apresenta o histograma para as variáveis, que representam a diferença entre dados SRTM e GCPs (SRTM – GCPs), SRTM e área de dunas (SRTM - MDE VANT/ÁREA DE DUNAS) e SRTM e área vegetada (SRTM – MDE VANT/ÁREA VEGETADA).

Figura 26. Histograma para as variáveis que analisam a diferença em altimetria entre dados de SRTM e GCPs (SRTM x GCPs), SRTM e área de dunas (SRTM x MDE RPA/ÁREA DE DUNAS), SRTM e área vegetada (SRTM x MDE RPA/ÁREA VEGETADA) e as diferenças entre de MDE produzido por RPR e dados de GPS (MDE RPA x GPS).



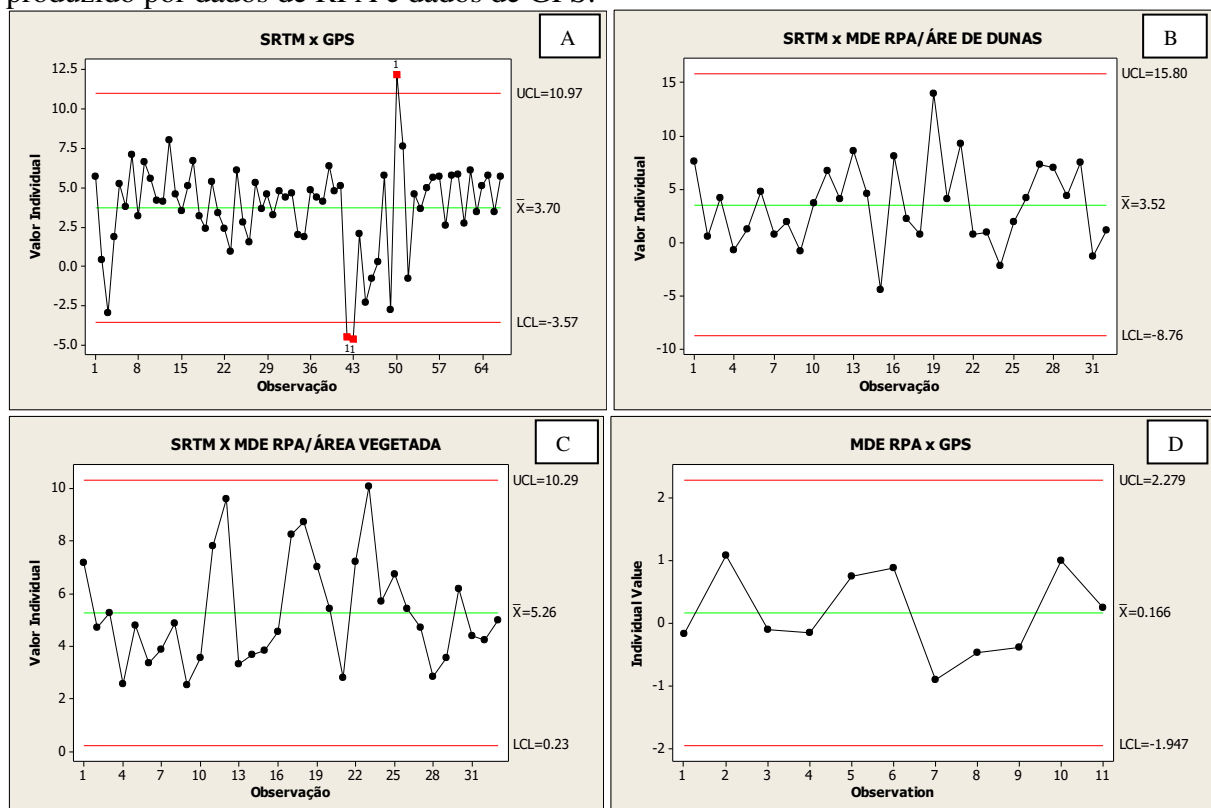
Fonte: Autor (2018).

A análise da Figura 26 deixa claro que os erros altimétricos apresentados entre os dados colhidos com GPS (adotados como padrão em função da qualidade adquirida) e o MDE gerado a partir de dados obtidos por RPA foi a fonte de dados que apresentou menor variação, concentrado a densidade dos erros em torno de zero. Já as demais variáveis apresentaram maior Ranger (diferença entre máximo e mínimo), sendo que a área com maior aporte de vegetação apresentou maior média (5,26 metros).

A Figura 27 exibe as cartas de controle para as variáveis em pauta. Pela figura observa-se que, com exceção dos dados que comparam SRTM e dados de GPS, o processo encontra-se sob controle estatístico para as variáveis, indicando que os erros apresentam variações que estão controladas e que essas variações estão dentro dos limites de controle do processo.

Salienta-se que foi realizado teste de normalidade para os três conjuntos de dados analisados no trabalho, condição necessária para se poder produzir e analisar as cartas de controles. Dos dados analisados, a variável que representa a diferença entre os dados SRTM e os pontos de GPS não apresentou normalidade. Contudo, com o objetivo de visualizar a distribuição dos dados na carta e observar onde estavam os pontos de maior dispersão optou-se por apresentar a carta de controle também para essa variável.

Figura 27. Cartas de controles para diferença entre dados SRTM e dados de GPS (SRTMxGCPs) (A), SRTM e área de dunas (SRTMxMDE RPA/ÁREA DE DUNAS) (B), SRTM e área vegetada (SRTMxMDE RPA/ÁREA VEGETADA) (C) e diferenças entre MDE produzido por dados de RPA e dados de GPS.



Fonte: Autor (2018).

De uma forma geral, o controle estatístico de processo explica as variações internas de um processo, denominadas de variação natural, podendo assim distingui-las das

causas especiais, que em geral são identificáveis (MONTGOMERY, 2004). Assim, pela observação do comportamento apresentado pelas cartas de controles para os dados de diferença de elevação entre SRTM e MDE obtido por RPA para área de dunas (Figura 27B) e SRTM e MDE obtido por RPA para área vegetada (Figura 27C), bem como as diferenças entre dados de MDE produzido por RPA e dados de GPS (Figura 27D) conclui-se que as variações estão dentro dos limites de controles.

Os dados que representam a diferença entre as elevações SRTM e elevações obtidas por GPS (Figura 27A), que não apresentaram normalidade pelo teste estatístico de normalidade, indicaram um processo fora de controle, com três pontos estando fora dos limites estabelecidos como limites de controle para os dados. Esse comportamento provocou curiosidade, fato que levou a uma análise mais detalhada dos pontos que se apresentaram fora dos limites, com o objetivo de entender os motivos de suas variações. Nesse processo, observou-se que os pontos em questão estão localizados na região de dunas móveis ou no traçado de uma estrada que foi construída após o mapeamento pela missão SRTM, o que explica a maior variação desses pontos em relação aos demais.

Os trabalhos relacionados ao uso e aplicações dos RPA's, principalmente em contextos relacionadas à qualidade, estão sendo desenvolvidos recentemente. Hung *et al.* (2018) avaliando o uso de RPA no mapeamento de área com vegetação esparsa encontraram diferença altimétrica máxima foi de 0,53 m e a mínima foi inferior a 0,01 m e, os valores de EP e PEC, compatíveis com a escala 1:5.000 (Classe A). Conseguiram ainda espacializar a altura da vegetação do reflorestamento de pinus e das áreas com vegetação nativa. A validação do MDV (Modelo Digital da Vegetação) indicou que a maior diferença foi de -0,9 m e a menor foi de 0,22 m e EP = 0,54 m.

Quando se trata de análise de dados de sensor remoto orbital, como o SRTM, diversos resultados de trabalhos já estão disponíveis com propósito de avaliar a qualidade dos dados topográficos. Segundo Costa *et al.* (2010), devido à influência da vegetação no retorno do sinal do RADAR interferométrico, podem haver maiores ou menores erros de altitude, dependendo do tipo de cobertura vegetal. Ludwig; Schneider (2006), observaram variação altimétrica da ordem de 0,5 a 4,0 m em áreas com cultivo de plantas de pequeno porte. Santos *et al.* (2006) estimaram EMQ em torno de 7,0 m para dados levantados na Amazônia.

Dentre as avaliações, destacamos a realizada no Equador e em Honduras para comparar o MDE desenvolvido a partir do SRTM e MDE gerado pelo GTOPO30, que representa uma compilação de várias fontes de dados de altitude. Comparando as duas fontes de dados no Equador, Jarvis *et al.* (2004) verificaram que em grandes áreas onde, por falta de

dados o GTOPO30 realizou uma interpolação, usando dados de áreas vizinhas, os dados do SRTM apresentaram melhor qualidade.

De acordo com as especificações técnicas da missão SRTM, os MDEs foram produzidos com uma precisão vertical de 16 m, com 90% de certeza (RABUS *et al.*, 2003). Contudo, esses são valores de precisões bastante baixos quando se deseja altos níveis de precisões ou se trabalha com micro-áreas topográficas.

Oliveira; Paradella (2008), avaliando a geração de dados altimétricos para mapeamento topográfico a partir dos dados RADARSAT-1, SRTM e ASTER na Serra de Carajás (relevo montanhoso) e Floresta Nacional de Tapajós (relevo plano) concluíram que, para o relevo plano, a precisão altimétrica do MDE do SRTM e do RADARSAT-1 atendiam ao PEC (Padrão de Exatidão Cartográfico) definido para a escala 1:100.000, mas que, para o relevo montanhoso, apenas o SRTM e ASTER atendiam aos padrões exigidos.

Costa *et al.* (2010), analisando a influência da vegetação nos dados SRTM para bacias hidrográficas no semiárido brasileiro, observaram erro médio de 7,7 m para área de estudo. Entretanto, a classe de vegetação com maior porte apresenta menor acurácia, com erro médio de 14,0 m e a vegetação de menor porte erro em torno de 1,8 m, indicando a menor influência das vegetações de menor porte no sinal e nos resultados em termos topográficos.

Em Honduras a análise foi efetuada com a comparação do MDE gerado pelo SRTM e pelos dados de uma carta na escala 1:50.000, com resultados demonstrando que, neste caso, o MDE SRTM é mais preciso que o derivado da carta de 1:50.000, comparados com a medições baseada em dados de campo obtidos por GPS. Os erros médios para o MDE SRTM foram de 8 m contra 20 m para o MDE obtido por meio dos dados da carta de 1:50.000 (JARVIS *et al.*, 2004).

Embora o trabalho tenha sido realizado em uma área pequena, diante dos dados observados e das discussões aqui colocadas, fica evidente que o uso da técnica de mapeamento aerofotogramétrico com uso de RPA tendo como foco a geração de MDE para dar suporte a projetos diversos é uma técnica viável, que apresenta qualidade satisfatória segundo o padrão de qualidade regido pelo Exército brasileiro para dados altimétricos.

3.4 CONCLUSÕES

Os dados SRTM apresentaram erros médios de 3,70m, 5,26m e 3,52m em relação aos dados de GPS, MDE obtido por meio de RPA para área com vegetação e MDE obtido por

meio de RPA para área de dunas móveis, respectivamente.

O MDE obtido com base em levantamento aerofotogramétrico por meio do uso de RPA apresentou melhor qualidade em termos de enquadramento no PEC (Padrão de Exatidão Cartográfico) quando comparado com dados SRTM, atendendo a escala na classe A a partir de 1:5.000 e classe B na escala a partir de 1:1.000.

O melhor enquadramento que o SRTM apresentou em relação ao PEC para classe A foi para escala 1:10.000, sendo que, na escala de 1:1.000, o referido MDE pode ser classificado na classe C.

Os erros que descrevem as diferenças altimétricas entre dados de MDE obtidos por meio de levantamento aerofotogramétrico com RPA e dados de GPS estão sob controle, indicando que as variações de erros existentes são inerentes ao processo e que esses erros estão controlados.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo em pauta teve como principal foco fazer a análise da qualidade de métodos e produtos topográficos obtidos por meio de levantamento aerofotogramétrico com uso de RPA's, com estudos realizados em uma área de pátio de minério de carvão mineral e uma área em ambiente natural, com presença de dunas e vegetação. Para tanto, foi medido a qualidade através de métodos e equipamentos que são convencionalmente aceitos como referência segundo a legislação brasileira.

Partiu-se do pressuposto que o uso de RPA's para aplicações em mapeamentos com foco em levantamentos de dados para suporte a projetos técnicos apresenta qualidade satisfatória e que o processo envolvido na geração de nuvens de pontos e produtos técnicos a partir de dados primários constitui método sob controle de processo.

Nesse contexto, avaliamos a qualidade do processo na aplicação do método de coleta de pontos topográficos por sistema RTK (*Real Time Kinematic*), bem como a influência dos erros do operador, a qualidade de processo para ajuste de GCP's em processamento digital de imagens, a influência de duas alturas de voo e sobreposição de imagens nos resultados finais de dados técnicos e a qualidade de produtos cartográficos obtidos por meio de levantamento aerofotogramétrico com uso de RPA para áreas com presença de vegetação e dunas móveis, tendo como fonte de dados, além do RPA, dados de GPS e MDE do STRM.

De acordo com os resultados obtidos, os erros horizontais e verticais relacionados ao modelo de RTK e ao operador, bem como os erros relacionados ao ajuste de coordenadas para as direções Este, Norte e Elevação dos GCP's para alturas de vôos a 70 e 120 metros de altura ficaram dentro dos limites de controle, indicando, portanto, que neste caso o processo encontra-se sob controle.

Os resultados também indicaram que as variações na altura de vôo e na sobreposição não interferiram de forma negativa na qualidade do ajuste dos erros dos GCP's na etapa de processamento dos dados pelo software utilizado (Pix4DMapper). Porém, embora a variação na altura de voo e na sobreposição lateral não tenha produzido efeitos sobre a qualidade de ajustes em relação aos GCP's, os resultados indicaram variações nos dados de volumes, com efeitos negativos maiores sobre pilhas de dimensões menores.

No trabalho que avaliou dados obtidos por meio do uso de RPA's, dados GNSS obtidos por GPS e MDE do SRTM, embora tenha sido realizado em uma área de abrangência pequena, ficou evidente que a técnica de mapeamento aerofotogramétrico com uso de RPA

tendo como foco a geração de MDE para dar suporte a projetos diversos é uma técnica viável, que apresenta qualidade satisfatória segundo o padrão de qualidade regido pelo Exército brasileiro para dados altimétricos (PEC altimétrico), atendendo a escala na classe A a partir de 1:5.000 e classe B já na escala a partir de 1:1.000.

Os erros médios observados para os dados SRTM foram de 3,70m, 5,26m e 3,52m em relação aos dados de GPS, MDE obtido por meio de RPA para área com vegetação e MDE obtido por meio de RPA para área de dunas móveis, respectivamente, com amplitude dos erros sendo maior na comparação dos SRTM com MDE do RPA na região de dunas móveis 18,42.

O melhor enquadramento que o SRTM apresentou em relação ao PEC para classe A foi para escala 1:10.000, sendo que, na escala de 1:1.000, o referido MDE pode ser classificado na classe C.

Foi observado também que o MDE obtido com base em levantamento aerofotogramétrico por meio do uso de RPA apresentou melhor qualidade em termos de enquadramento no PEC (Padrão de Exatidão Cartográfico) quando comparado aos dados SRTM e que os erros que descrevem as diferenças altimétricas entre dados de MDE obtidos por meio de levantamento aerofotogramétrico com RPA e dados de GPS estão sob controle, indicando que as variações de erros existentes são inerentes ao processo e que esses erros estão controlados.

Cabe salientar que, pelas análises realizadas foi possível identificar movimentação de dunas entre os períodos da passagem do SRTM e a coleta de informações com GPS e RPA, indicando potencialidade da integração dessas tecnologias para o monitoramento de áreas costeiras.

Contudo, é importante ressaltar que essas técnicas e processos envolvendo a aquisição e processamento de dados obtidos por meio do uso de RPA são bastante recentes e que suas aplicações em projetos técnicos devem ser feitas de forma criteriosa, e, sempre que possível acompanhada de avaliação criteriosa por parte dos técnicos que produzem os dados, bem como pelos usuários dos produtos técnicos gerados pelo uso dessa tecnologia.

REFERÊNCIAS

ARIZA, F.J. **Calidad En La Producción Cartográfica**. Ed RA-MA, 2002.

BANZATTO, D. A; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola**. 4. ed. Jaboticabal: Funep, 2006. 237 p.

BARROS, R. S; MADUREIRA CRUZ, C. B; REIS, R. B; JÚNIOR, N. A. C. Avaliação do modelo digital de elevação do SRTM na ortorretificação de imagens Landsat 7 – Área de aplicação: Angra dos Reis – RJ. In: **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil: Anais, p. 3997-4004, 2005.

BENDEA, H. F; CHIABRANDO, F; TONOLO, F. G; MARENCHINO, D. Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV the Augusta Bagiennorum Test site. In: **XXI International Symposium**, Athen, Greece: Resumos Expandidos, 2007.

BIAS, E. S; RIBEIRO, R. J. C; BAPTISTA, C. M; BERNARDI, J. V. E. Avaliação da exatidão do MDE obtido por meio do srtm e pela de carta do ibge na escala 1:100.000. **Revista Brasileira de Cartografia**. [S.I], v. 63, n.01, p.149-155, 2010.

BRASIL. EXERCITO BRASILEIRO. **Norma da Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais de Defesa da Força Terrestre, (EB80-N-72.003)** 2. ed., n. 18, 2016.

CARVALHO, T. M; BAYER, M. Utilização dos produtos da “shuttle radar topography mission” (SRTM) no mapeamento geomorfológico do estado de Goiás. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. [S.I], v.9, n.1, p.35-41, 2008.

CARVALHO, T.M; LATRUBESSE, E.M. O uso de modelos digitais do terreno (MDT) em análises macrogeomorfológicas: o caso da bacia hidrográfica do Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. [S.I], v.5, n.1, p. 85-93, 2004.

CONCAR, E. B. **Exército Brasileiro. Especificação Técnica Para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais**. Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais. 2 ed. Brasil, 2011.

COSTA, C. A. G; TEIXEIRA, A. S; ANDRADE, E. M.; LUCENA, A. M. P; CASTRO, M. A. H. Análise da influência vegetacional na altimetria dos dados SRTM em bacias hidrográficas no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**. [S.I], v. 41, n. 2, p. 222-230, 2010.

HORCHER, A; VISSER, R. J. M. Unmanned Aerial Vehicles: Applications for Natural Resource Management and Monitoring. In: **COUNCIL ON FOREST ENGINEERING ANNUAL MEETING**, Hot Springs (AR), USA: Anais, 2004.

HUNG, M.N.W.B; SAMPAIO,T.V.M; SCHULTZ,G.B; SIEFERT,C.A.C; LANGE,D.R., MARANGON, F.H.S; SANTOS,I. Levantamento com veículo aéreo não tripulado para geração de modelo digital do terreno em bacia experimental com vegetação florestal esparsa. **Revista Espaço Geográfico em Ação**. Curitiba, v.43, p. 215 -231 , 2018.

JARVIS A; RUBIANO J; NELSON A; FARROW A; MULIGAN M. Practical use of SRTM data in the tropics: comparison with digital elevations models generated from cartographic data. **CIAT Working Doc 198**. Colombia, 2004.

LUDWIG, R; SCHNEIDER, P. Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modeling. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**. [S.I], v. 60, n. 05, p. 339-358, 2006.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4.ed. São Paulo: LTC, 2004. 513 p.

MICELI, B. S; DIAS, F.M; SEABRA, F. M; SANTOS. P. R. A; FERNANDES, M. C. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. **Revista Brasileira de Cartografia**. [S.I], v. 63, n.01, p. 191-201, 2011.

MILIARESIS, G. C; PARASCHOU, C. V. E. Vertical accuracy of the SRTM DTED level 1 of Crete. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. [S.I], v. 07, n. 01, p. 49-59, 2005.

NOGUEIRA, M. L; AUGUSTO, V. A; BRANCO, R. M. G. C; CASTRO, D. L. Caracterização Geoambiental e Hidrogeológica da Zona Portuária do Pecém/CE. **Revista de Geologia**. [S.I], v. 18, n. 2, p. 203-213, 2005.

OIKONOMOU, C; STATHOPOULOU, E. K; GEORGOPOULOS, A. Contemporary data acquisition technologies for large scale mapping. In: **35th EARSeL Symposium – European Remote Sensing. Progress, Challenges and Opportunities**. Stockholm, Sweden: Anais, 2015.

OLIVEIRA C.G; PARADELLA W.R. An Assessment of the Altimetric Information Derived from Spaceborne SAR (RADARSAT-1, SRTM3) and Optical (ASTER) Data for Cartographic Application in the Amazon Region. **Sensors** 8. [S.I], p. 3819-3829, 2008.

PATIAS, P; SAATSOGLOU-PALIADELI, C; GEORGOULA, O; PATERAKI, M; STAMNAS, A; KYRIAKOU, N. Photogrammetric documentation and digital representation of the Macedonian palace in Vergina-Aegeae. In: **Cipa, XXI International Cipa Symposium**. Athens, Greece: Anais, 2007.

PINHEIRO, H. S. K; CHAGAS, C. S; JÚNIOR, W. C; ANJOS, L. H. C. Modelos de elevação para obtenção de atributos topográficos utilizados em mapeamento digital de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.47, n.9, p.1384-1394, 2012.

Pix4D. **TOOLS - GSD Calculator**. Disponível em: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202560249-TOOLS-GSD-Calculator#gsc.tab=0>. Acesso em: 25 out. 2016.

RABUS, B; EINEDER, M; ROTH, A; BAMLER, R. The shuttle RADAR topography-a new class of digital elevation models acquired by space borne RADAR. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. [S.I], v. 57, n. 04, p. 241-262, 2003.

RAO, K. S. **Validation of Digital Elevation Model Derived from Shuttle Radar Topography Mission using GPS Field measurements.** [s.n], 2004.

REIDELSTUERZ, P; LINK, J; GRAEFF, S; CLAUPEIN, W. Uav (unmanned aerial vehicles) für Präzisionslandwirtschaft. 13 Workshop Computer Bildanalyse in der Landwirtschaft & 4. Workshop Precision Farming, In: **Bornimer Agrartechnische Berichte.** [S.I], Anais, 2007.

REMONDINO, F; EL-HAKIM, S. F; GRUEN, A; ZHANG, L. Turning images into 3D models – development and performance analysis of image matching for detailed surface reconstruction of heritage objects. **IEEE Signal Processing Magazine**, [S.I], v. 25, n.4, p.55–65, 2008.

REMONDINO, F; BARAZZETTI, L; NEX, F; SCAIONI, M; SARAZZI, D. Uav photogrammetry for mapping and 3d modeling—current status and future perspectives. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, [S.I], v. 38, n.1, 2011.

REMONDINO, F; SPERA, M.G; NOCERINO, E; MENNA, F; NEX, F. State of the art in high density image matching. **The Photogrammetric Record** 29. [S.I], v. 29, n.146, p.144-166, 2014.

ROCK, G; RIES, J. B; UDELHOVEN, T. Sensitivity Analysis of UAV Photogrammetry for Creating Digital Elevation Models (DEM). In: **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.** Zurich, Switzerland: Anais, 2011.

SANTOS, P. R. A; GABOARDI, C; OLIVEIRA, L. C. Avaliação da Precisão Vertical dos Modelos SRTM para a Amazônia. **Revista Brasileira de Cartografia.** [S.I], v. 58, n.01, p.101-107, 2006.

SHARY, P; SHARAYA, L; MITUSOV, A. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. **Geoderma.** [S.I], v.107, p.1-32, 2002.

SUGIURA, R; NOGUCHI, N; ISHII, K. Remote-sensing Technology for Vegetation Monitoring using an Unmanned Helicopter. **Biosystems Engineering**, [S.I] v. 90, n.4, p.369–379, 2005.

SANTOS. S. D .R; HUINCA, S. C. M; MELO, L. F. S; SILVA, M. T. Q. S; DELAZARI, L. S. Considerações sobre a utilização do pec (padrão de exatidão cartográfica) nos dias atuais. In: **III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.** Recife – PE : Anais, 2010.

SILVA, C. A; SOUTO, M. V. S; DUARTE, C. R; BICHO, C. P; SABADIA, J. A. B. Avaliação da acurácia dos ortomosaicos e modelos digitais do terreno gerados pelo MVANT/DNPM. BCG . **Revista Brasileira de Cartografia.** [S.I], v. 67, n. 7, p. 1479-1495, 2015.

THOMPSON, J. A; BELL, J. C; BUTLER, C. A. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modelling. **Geoderma.** [S.I], v.100, p.67-89, 2001.

TRIMBLE R4. **Model 3 gnss receiver. Version 4.80.** Revision A, 2013. Disponível em: <https://www.manualslib.com/manual/828648/Trimble-Trimble-R8.html#manual>. Acesso em: 25 out. 2016.

VALERIANO, M. M; KUPLICH, T. M; STORINO; M. AMARAL, B. D; MENDES, J. N; LIMA D. J. Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90 m data. **Computers and Geoscience**. [S.I], v.32, p1169-1181, 2005.

VITTI, D. M. C; JÚNIOR, C. B; INOCÊNCIO, L. C; VERONEZ, M. R; JÚNIOR, J. C. T. V; MAUAD, F. F. Acurácia horizontal do mapeamento de um trecho da área de concessão da UHE de Bariri, SP com imagens de alta resolução coletadas com RPAS. In: **XVIII SBR. 28.** Santos-SP: Anais, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Mauricio_Veronez/publication/318351207_Acuracia_horizontal_do_mapeamento_de_um_trecho_da_area_de_concessao_da_UHE_de_Bariri_SP_com_imagens_de_alta_resolucao_coletadas_com_RPAS/links/59653668a6fdcc69f148bc79/Acuracia-horizontal-do-mapeamento-de-um-trecho-da-area-de-concessao-da-UHE-de-Bariri-SP-com-imagens-de-alta-resolucao-coletadas-com-RPAS.pdf. Acesso em: 23 jul. 2018.

ANEXO A - FATORES PARA CONSTRUÇÃO DE GRÁFICOS DE CONTROLE PARA VARIÁVEIS

Observations in Sample, n	Chart for Averages					Chart for Standard Deviations						Chart for Ranges				
	Factors for Control Limits			Factors for Center Line		Factors for Control Limits						Factors for Control Limits				
	A	A_2	A_3	c_4	$1/c_4$	B_3	B_4	B_5	B_6	d_2	$1/d_2$	d_3	D_1	D_2	D_3	D_4
2	2.121	1.880	2.659	0.7979	1.2533	0	3.267	0	2.606	1.128	0.8865	0.853	0	3.686	0	3.267
3	1.732	1.023	1.954	0.8862	1.1284	0	2.568	0	2.276	1.693	0.5907	0.888	0	4.358	0	2.574
4	1.500	0.729	1.628	0.9213	1.0854	0	2.266	0	2.088	2.059	0.4857	0.880	0	4.698	0	2.282
5	1.342	0.577	1.427	0.9400	1.0638	0	2.089	0	1.964	2.326	0.4299	0.864	0	4.918	0	2.114
6	1.225	0.483	1.287	0.9515	1.0510	0.030	1.970	0.029	1.874	2.534	0.3946	0.848	0	5.078	0	2.004
7	1.134	0.419	1.182	0.9594	1.0423	0.118	1.882	0.113	1.806	2.704	0.3698	0.833	0.204	5.204	0.076	1.924
8	1.061	0.373	1.099	0.9650	1.0363	0.185	1.815	0.179	1.751	2.847	0.3512	0.820	0.388	5.306	0.136	1.864
9	1.000	0.337	1.032	0.9693	1.0317	0.239	1.761	0.232	1.707	2.970	0.3367	0.808	0.547	5.393	0.184	1.816
10	0.949	0.308	0.975	0.9727	1.0281	0.284	1.716	0.276	1.669	3.078	0.3249	0.797	0.687	5.469	0.223	1.777
11	0.905	0.285	0.927	0.9754	1.0252	0.321	1.679	0.313	1.637	3.173	0.3152	0.787	0.811	5.535	0.256	1.744
12	0.866	0.266	0.886	0.9776	1.0229	0.354	1.646	0.346	1.610	3.258	0.3069	0.778	0.922	5.594	0.283	1.717
13	0.832	0.249	0.850	0.9794	1.0210	0.382	1.618	0.374	1.585	3.336	0.2998	0.770	1.025	5.647	0.307	1.693
14	0.802	0.235	0.817	0.9810	1.0194	0.406	1.594	0.399	1.563	3.407	0.2935	0.763	1.118	5.696	0.328	1.672
15	0.775	0.223	0.789	0.9823	1.0180	0.428	1.572	0.421	1.544	3.472	0.2880	0.756	1.203	5.741	0.347	1.653
16	0.750	0.212	0.763	0.9835	1.0168	0.448	1.552	0.440	1.526	3.532	0.2831	0.750	1.282	5.782	0.363	1.637
17	0.728	0.203	0.739	0.9845	1.0157	0.466	1.534	0.458	1.511	3.588	0.2787	0.744	1.356	5.820	0.378	1.622
18	0.707	0.194	0.718	0.9854	1.0148	0.482	1.518	0.475	1.496	3.640	0.2747	0.739	1.424	5.856	0.391	1.608
19	0.688	0.187	0.698	0.9862	1.0140	0.497	1.503	0.490	1.483	3.689	0.2711	0.734	1.487	5.891	0.403	1.597
20	0.671	0.180	0.680	0.9869	1.0133	0.510	1.490	0.504	1.470	3.735	0.2677	0.729	1.549	5.921	0.415	1.585
21	0.655	0.173	0.663	0.9876	1.0126	0.523	1.477	0.516	1.459	3.778	0.2647	0.724	1.605	5.951	0.425	1.575
22	0.640	0.167	0.647	0.9882	1.0119	0.534	1.466	0.528	1.448	3.819	0.2618	0.720	1.659	5.979	0.434	1.566
23	0.626	0.162	0.633	0.9887	1.0114	0.545	1.455	0.539	1.438	3.858	0.2592	0.716	1.710	6.006	0.443	1.557
24	0.612	0.157	0.619	0.9892	1.0109	0.555	1.445	0.549	1.429	3.895	0.2567	0.712	1.759	6.031	0.451	1.548
25	0.600	0.153	0.606	0.9896	1.0105	0.565	1.435	0.559	1.420	3.931	0.2544	0.708	1.806	6.056	0.459	1.541

For $n > 25$.

$$A = \frac{3}{\sqrt{n}} \quad A_3 = \frac{3}{c_4 \sqrt{n}} \quad c_4 \equiv \frac{4(n-1)}{4n-3}$$

$$B_3 = 1 - \frac{3}{c_4 \sqrt{2(n-1)}} \quad B_4 = 1 + \frac{3}{c_4 \sqrt{2(n-1)}}$$

$$B_5 = c_4 - \frac{3}{\sqrt{2(n-1)}} \quad B_6 = c_4 + \frac{3}{\sqrt{2(n-1)}}$$

**APÊNDICE A - LISTA DE COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS MÉDIAS PARA
OS 13 (TREZE) GCP'S**

PONTO	COORDENADA LESTE (m)	COORDENADA NORTE (m)	COORDENADA ELEVAÇÃO¹ (m)
GCP1	513673,051	9603769,193	10,223
GCP2	513665,640	9603812,213	10,149
GCP3	513345,155	9603735,368	20,618
GCP4	513227,863	9603682,320	10,246
GCP5	513228,686	9603730,448	10,281
GCP6	513211,573	9603740,937	10,268
GCP7	513163,039	9603828,552	10,402
GCP8	513420,080	9603813,798	22,407
GCP9	513678,957	9603838,230	10,151
GCP10	513649,574	9603920,981	10,030
GCP11	513623,723	9603971,942	10,368
GCP12	513566,711	9603937,442	18,609
GCP13	513211,055	9603895,649	10,460

¹Elevação co base no elipsóide de revolução do Datum SIRGAS 2000, para zona 24S.