UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA
AMBIENTAL

DALVA MARIA DE CASTRO VITTI

**Exatidão posicional de produtos cartográficos digitais com RPAS
(*Remotely Piloted Aerial System*) para mapeamento da área seca de
reservatório**

SÃO CARLOS-SP

2017

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA
AMBIENTAL

DALVA MARIA DE CASTRO VITTI

**Exatidão posicional de produtos cartográficos digitais com RPAS
(*Remotely Piloted Aerial System*) para mapeamento da área seca de
reservatório**

(Versão Original)

Tese apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental,
ênfase em Planejamento e Gerenciamento de
Recursos Hídricos como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Assoc. Frederico Fábio Mauad

SÃO CARLOS-SP

2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

V852e Vitti, Dalva Maria de Castro
Exatidão Posicional de produtos cartográficos
digitais com RPAS (Remotely Piloted Aerial System) para
mapeamento do área seca de reservatório / Dalva Maria
de Castro Vitti; orientador Frederico Fábio- Mauad.
São Carlos, 2017.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área
de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2017.

1. Precisão. 2. Reservatório. 3. Sensoriamento
Remoto. 4. SfM. 5. VANT. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: **DALVA MARIA DE CASTRO VITTI**

Título da tese: "Acurácia posicional de produtos da fotogrametria com RPAS para mapeamento da área seca de reservatório"

Data da defesa: 15.09.2017

Comissão Julgadora:

Prof. Associado **Frederico Fred Mauad**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Associado **Oswaldo Augusto Filho**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **José Augusto de Lollo**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/Unesp – Ilha Solteira)

Prof. Dr. **Maurício Roberto Veronez**
(Universidade do Vale do Rio dos Sinos/Unisinos)

Profª. Drª. **Valéria Lopes Rodrigues**
(Faculdade de Tecnologia de Jaú/Fatec – Jahu)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental:
Prof. Associado **Frederico Fabio Mauad**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Resultado:

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Aprovada

Dedico a
Lucas e Denilson

“Senhor, vossas obras são estupendas.”

Salmo 66:4

“Se quiser ir rápido vá sozinho, se quiser ir longe vá em grupo”.

Provérbio Africano

AGRADECIMENTOS

Ao mestre maior, Jesus Cristo, pelo grande ensinamento que tudo é possível pela FÉ.

À minha família, para onde sempre voltamos para enchermos de amor e seguirmos a caminhada. Em especial, ao meu esposo, Denilson, pelo companheirismo e cumplicidade. Ao meu filho, Lucas, resposta para todas as incertezas.

Ao meu orientador, Frederico Fábio Mauad, pelos conselhos nas subliminares nos intervalos do café. Só quem é de Minas Gerais tem essa sabedoria.

À Célia Bento de Mello, um anjo que sempre esteve ao meu lado.

Aos meus amigos da vida inteira: Fátima Murdiga, Lígia Mancini, João Geraldo, Odilon Souza, Célia e Cecília, incentivadores e desafiadores.

Aos meus amigos de caminhada Bruno Bernardo dos Santos, Cláudio Bielenki Júnior, Franciane Mendonça dos Santos, Renato Billia de Miranda, Valdomiro Filho, Tainá Thomassim Guimarães, Marcus Vínicius Estigoni, João Marcos Vilella, Ailton Fiorentin, Paulo Bairros, Norvin, Renato e Paulo Ponce Arroio.

A todos os Professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Escola de Engenharia de São Carlos.

À todos os funcionários do Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais, em especial Regina, Cidão, Carlos, Nelson e José Luiz. À Angela Gianpietro pela paciência na revisão dos textos em inglês.

Aos meus alunos e colegas da Faculdade de Tecnologia de Jahu, pela compreensão do tempo de ausência. E, em especial, a Ademir Marques Júnior, pela parceria neste trabalho.

Aos amigos e colegas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, do Laboratório de Visualização Avançada – Vizlab da Universidade do Vale dos Sinos de São Leopoldo – RS, Maurício Roberto Veronez, Leonardo Campos Inocência, Fabiane Bordin e Tainá Guimarães Thomassim, pelo apoio incondicional.

Ao Prof. Marcelo Becker pela grande contribuição neste trabalho ao recomendar o contato com Giovanni Amianti, da empresa XMobots de São Carlos-SP, no qual fez a gentileza de doar as imagens digitais da UHE de Bariri – SP.

À FIPAI – Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial pelo investimento em equipamentos que deram suporte a este trabalho.

A Gabriel Evangelista, da empresa GEOCOM, por compartilhar seus conhecimentos.

RESUMO

VITTI, Dalva Maria de Castro. **Exatidão posicional de produtos cartográficos digitais com RPAS (Remotely Piloted Aerial System) para mapeamento da área seca de reservatório.** 2017. 202 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Neste trabalho foi realizada a coleta de imagens de um trecho da área seca da UHE Álvaro de Souza Lima (Bariri – SP) e do lago da UNISINOS (São Leopoldo-RS), com câmeras e sensores, embarcados em RPAS (sistemas aéreos remotamente pilotados). As imagens resultantes foram processadas através da técnica estrutura do movimento (SfM), gerando ortomosaicos e modelos digitais de terrenos (MDTs). Pontos de checagem observados nestas imagens foram comparados com seus homólogos, obtidos por meio de posicionamento global diferencial no modo RTK. Testes estatísticos para verificação de hipóteses prévias de independência, aleatoriedade e normalidade, bem como, cálculos estatísticos e testes de inferência estatística foram realizados nas discrepâncias horizontais e verticais de ambos os produtos cartográficos. A verificação da exatidão vertical foi realizada somente nos produtos MDTs, a partir de feições de controle. O objetivo principal foi avaliar produtos cartográficos digitais gerados a partir de imagens coletadas por RPAS, quanto aos requisitos mínimos de exatidão geométrica para atendimento às leis estabelecidas pelos órgãos reguladores de energia elétrica. As discrepâncias horizontais observadas no ortomosaico da Unidade Hidroelétrica de Bariri apresentaram independência, não aleatoriedade e distribuição normal. Já para as discrepâncias verticais, foram independentes, aleatórias e normais. O teste *t* Student revelou tendência na posição horizontal e não tendência na vertical. O desvio padrão e o RMSE horizontais foram confrontados com o Padrão de Exatidão Cartográfica brasileiro através do teste Qui quadrado, indicando que os produtos têm precisão horizontal na escala 1:2000 (classe C) e, o MDT, na escala 1:10.000 (classe C), ambos com 95% de confiança e 22 e 19 graus de liberdade, respectivamente. A comparação entre MDTs conduziu a resultados semelhantes, porém demonstrou que maiores discrepâncias ocorreram devido a fraca sobreposição de imagens. Para os produtos do lago UNISINOS, as discrepâncias cumpriram as hipóteses de independência e aleatoriedade. Porém, a normalidade não foi constatada pelo teste de Shapiro-Wilk. No entanto, através do teste U de Mann-Whitney, os produtos obtidos via sensor apresentaram semelhanças entre os pontos amostrados e seus homólogos. Através do teste direcional, os ângulos de direção foram medidos e caracterizaram a tendência horizontal para os ortomosaicos da UHE e do lago UNISINOS. Os resultados demonstraram que o mapeamento através de imagens via sensores embarcados em RPAS e processadas por SfM apresentaram exatidão posicional para integração com cartas de outras fontes, nas mesmas escalas. Portanto, estes produtos possibilitam a atualização de dados cartográficos para atender as demandas legais imputadas aos operadores de reservatórios.

Palavras-chave: Precisão. Reservatório. Sensoriamento Remoto. SfM. VANT.

ABSTRACT

VITTI, Dalva Maria de Castro. **Positional accuracy of digital cartographics products from RPAS (Remotely Piloted Aerial System) to mapping of dry area of reservoir.** 2017. 202 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

In this work, the image collection was carried out on a stretch of dry area of the Alvaro de Souza Lima UHE (Bariri - SP) and of the UNISINOS lake (São Leopoldo) by cameras and sensors embedded in RPAS (Remotely Piloted Aerial System). The resulting images were processed using the Structure from Motion (SfM) technique in order to generate ortomosaicos and Digital Terrain Models (MDTs). Checkpoints observed in these images were compared with their counterparts obtained through differential global positioning in the RTK mode. Statistical tests for checking previous hypotheses of independence, randomness and normality, as well as statistical calculations and inference tests were conducted in the EN and h discrepancies of both cartographic products. The vertical accuracy verification was performed only in the MDTs products, from control features. The main objective of this work was to evaluate of digital cartographic products generated from photogrammetry collected by RPAS, with regard to the minimum requirements of geometric accuracy for fulfillment of the laws established by electric power regulatory agencies. The discrepancies observed in the orthomosaic of the Bariri Hydropower Plant exhibited independence, non randomness and normal distribution. However, for the MDT, these were independent, random, and normal. Student's *t*-test showed a trend in the horizontal position and a non-trend in the vertical position. The horizontal standard deviation and RMSE (root mean square error) were analyzed according to the PEC-PCD Standard by the Chi-squared test, indicating that the orthomosaic fits at the 1:2,000 scale (class C), and the MDT, fits at the 1:10,000 scale (class C), both with a 95% confidence level and with degrees of freedom of 22 and 19, respectively. The comparison between MDTs leads to similar results, but showed that the largest discrepancies occur due to the weak overlap of the images. For the UNISINOS lake products, the discrepancies fulfilled the previous hypotheses of independence and randomness. But, the normality was not verified by the Shapiro-Wilk test. However, using the Mann-Whitney U test, the cartographic products obtained from a sensor showed similarities between the sampling points and their counterparts. By the directional test, it was measured the azimuth angles which characterizes the horizontal trend for the UHE and UNISINOS lake orthomosaics. The results demonstrated that the mapping by using images collected from sensors embedded in RPAS and processed through SfM presents positional accuracy for integration with maps from other sources, on the same scales. And therefore allows the updating of cartographic data map to meet the legal demands attributed to the reservoir operators.

Keywords: Precision. Reservoir. Remote Sensing. SfM. UAV.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção típica de armazenamento de água nos reservatórios	27
Figura 2 - Superfície do reservatório da PCH de Mogi Guaçu delimitada pela cota máxima maximorum.....	28
Figura 3 - Plataformas de sensoriamento remoto e campo de visada instantâneo (IFOV)	33
Figura 4 - Componentes embarcados num RPAS tipo hexarotor.....	34
Figura 5 - Procedimentos para execução da fotogrametria com RPAS	40
Figura 6 - Sobreposição lateral de imageamento com laser scanner embarcado em RPAS	42
Figura 7 - Relação entre altura do voo (H), altura do objeto (h) e FOV (w) em função do ângulo horizontal (roll (α)) em imagens oblíquas coletadas através de RPAS	43
Figura 8 - Processamento digital de imagens com conceitos de visão computacional pela técnica SfM.....	46
Figura 9 - Exemplo de imagens e log de voo da barragem da UHE Álvaro de Souza Lima, Bariri-SP	47
Figura 10 - Triangulação 3D e geometria epipolar na identificação do ponto P em SfM.....	48
Figura 11 - Representação de um modelo 3D georreferenciado (MDS). (A1) Imagens oblíquas usadas na reconstrução da cena 3D. (A2) Área de máscara. (A3) Pontos de interesse. (B) Nuvem esparsa de pontos e posição das câmeras. (C) Mapa de profundidades. (D) Modelo 3D. (E) Ortomosaico.	52
Figura 12 - Erro médio (%) da elevação afetado pela sobreposição e alturas de voo (50 e 100 m). As barras indicam a dimensão do valor do erro. Números entre parênteses indicam o número de árvores detectadas de um total de 30 usadas na validação	56
Figura 13 - Tamanho da amostra para checagem variando de 1 a infinito, para diferentes valores de Z	68
Figura 14 - Distribuição e espaçamentos dos pontos a serem testados para avaliação da exatidão horizontal e vertical de produtos cartográficos digitais	71
Figura 15 - Distribuição e espaçamento de pontos de controle.....	72
Figura 16 - Elementos do semivariograma para dados com (a) dependência espacial e (b) para dados independentes	79
Figura 17 - Distribuições de Von Mises com diferentes parâmetros de concentração	88
Figura 18 - Resultante em função da dispersão de vetores. (a) Menor dispersão, maior	

resultante e (b) maior dispersão, menor resultante	90
Figura 19 - Localização da área de estudo próxima à barragem de Bariri no Rio Tietê, Estado de São Paulo.....	106
Figura 20 - Localização do lago de contenção de águas pluviais da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS, RS.....	107
Figura 21 - Fluxograma de atividades de pesquisa para análise de exatidão posicional de produtos da fotogrametria através de RPAS	108
Figura 22 - RPAS de asa fixa, Echar 20B, terminal de comunicação de dados de solo e câmera Canon EOS 600D.....	109
Figura 23 - RPAS ST800 com câmeras (a) Canon ELPH 110 HS e sensor Parrot Sequóia. (b) Detalhe do sensor Parrot Sequóia	110
Figura 24 - Localização dos pontos de apoio para georreferenciamento da nuvem de pontos do lago UNISINOS	112
Figura 25 - Cobertura da área amostral por 73 imagens, posição da câmera em cada imagem e o número de sobreposições de imagens	114
Figura 26 - Fluxograma para análise da exatidão posicional a partir de pontos homólogos .	115
Figura 27 - Fluxograma para análise da exatidão do MDT _{RPAS} por meio de comparação com MDT _{controle}	116
Figura 28- Ortomosaico da área de estudo da UHE Álvaro de Souza Lima e 23 pontos de checagem.....	124
Figura 29 - Modelo digital do terreno da área de estudo da UHE Álvaro de Souza Lima	125
Figura 30 - Ortomosaico do lago da UNISINOS gerado a partir de imagens coletadas com câmera Canon ELPH 110HS. O ortomosaico foi coletado na banda falso NIR.....	126
Figura 31 - MDT do lago da UNISINOS gerado a partir de imagens coletadas com câmera Canon ELPH 110 S.....	127
Figura 32 – Ortomosaico do lago da UNISINOS gerado a partir de imagens coletadas nas bandas Green, Red e NIR do sensor Sequóia.....	128
Figura 33 - MDT do lago da UNISINOS gerado a partir de imagens coletadas nas bandas Green, Red e NIR do sensor Sequoia.....	129
Figura 34 - Distribuição espacial e semivariogramas das discrepâncias EN do ortomosaico Canon EOS 600D + SfM e semivariogramas 0°, -45°, 45°, 60° e 90°	136
Figura 35 - Distribuição e discrepâncias dos pontos de amostragem (h) do MDT Canon EOS	

600D + SfM e semivariogramas 0°, -45°, 45°, 60° e 90°	137
Figura 36 - Distribuição espacial e semivariogramas das discrepâncias EN através da câmera Canon ELPH 110S+SfM	138
Figura 37 - Distribuição espacial e semivariogramas a 0°, -45°, 30°, 45° e 90° das discrepâncias h extraídas do MDT Canon- ELPH 110S + SfM.....	139
Figura 38 - Distribuição espacial e semivariogramas das discrepâncias EN através do sensor Sequoia + SfM.....	140
Figura 39 - Distribuição das discrepâncias h dos pontos de amostragem através do sensor Sequoia e semivariogramas a 0°, -45°, 30°, 45° e 90°	141
Figura 40 - Teste de normalidade pela função de Shapiro-Wilk para as discrepâncias EN e h dos produtos Canon EOS 600D + SfM, ao nível de significância de 0,05.....	142
Figura 41 - Teste de normalidade das discrepâncias EN e h do ortomosaico e MDT gerados com as imagens coletadas através do sensor Canon ELPH 110S +SfM	142
Figura 42 - Resultado do teste de normalidade Shapiro-Wilk para EN e h obtidos através do sensor Sequoia + SfM.....	143
Figura 43 - Análise direcional das discrepâncias EN observadas no ortomosaico Canon EOS 600D + SfM com base na função de distribuição de von Mises ($k = 1,40$) 9 (a) e Canon ELPH 110 S + SfM ($k = 0,50$) (b) e Sequóia + SfM ($k = 0,50$) (c).....	154
Figura 44 - Malha regular de amostragem de elevações sobre MDT _{controle} e MDT _{RPAS}	164
Figura 45 - Distribuição espacial e semivariogramas das discrepâncias (h) extraídas do MDT _{RPAS}	165
Figura 46 - Histograma das diferenças das discrepâncias (h) (Canon EOS + SfM) amostradas em malha regular com curva de teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e distribuição espacial dos pontos de checagem	166
Figura 47 - Histograma com curva de Shapiro-Wilk e um exemplo de espacialização para as discrepâncias (h) observadas na amostragem aleatória sobre o MDT _{RPAS} em relação ao MDT _{controle}	171
Figura 48 - Localização das seções transversais sobre o ortomosaico e MDT	174
Figura 49 - Seções transversais 1 a 15, representativas dos deslocamentos entre MDT _{RPAS} e MDT _{controle}	175

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais aspectos cartográficos para geração e manutenção de informações para que operadores de energia elétrica atendam à legislação brasileira.....	31
Tabela 2 - Resumo das principais características dos sensores imageadores (passivos) para RPAS.....	38
Tabela 3 - Características da aquisição de imagens com RPAS e produtividade	44
Tabela 4 - Comparação entre modelagens com dados coletados com RPAS, GNSS diferencial e laser scanner	57
Tabela 5 - Componentes para avaliação da qualidade de uma base de dados geográficos.....	59
Tabela 6 - Componentes para avaliação da qualidade de uma base de dados geográficos com base no parâmetro resolução	60
Tabela 7 - Principais aspectos relacionados a qualidade de dados geoespaciais	61
Tabela 8 - Número de pontos de checagem da exatidão horizontal planimétrica e de ortorectificação e da exatidão horizontal e vertical de elevação, de acordo com a cobertura do solo	70
Tabela 9 - Classes de correlação entre resíduo padronizado e ações a serem tomadas na análise de independência das discrepâncias.....	80
Tabela 10 - Categorias de azimutes para teste de uniformidade da estatística circular	92
Tabela 11 - Principais características de padrões de exatidão cartográfica em alguns países .	96
Tabela 12 - Resumo dos aspectos de avaliação de metodologias de exatidão posicional	97
Tabela 13 - Parâmetros de análise para classificação do MDT de acordo com USGS.....	100
Tabela 14 - Comparação entre NMA e NSSDA para verificação da exatidão vertical.....	101
Tabela 15 - Comparação entre exatidão horizontal NMA e NSSDA em função da escala do mapa.....	102
Tabela 16 - Classificação das cartas quanto à exatidão, ao PEC e EP planimétrico e altimétrico	104
Tabela 17 - Padrão de exatidão cartográfica planimétrico de produtos cartográficos digitais	104
Tabela 18 - Padrão de exatidão cartográfica do MDT, MDE, MDS de produtos cartográficos digitais.....	104
Tabela 19 - Padrão de exatidão cartográfica da altimetria de Produtos cartográficos digitais	

.....	105
Tabela 20 - Características básicas da câmera RGB CANON ELPH 110HS e do sensor Parrot Sequóia, do voo e das imagens coletadas	110
Tabela 21 - Características dos pontos de controle utilizados nos produtos cartográficos da UHE Álvaro de Souza Lima e lago Unisinos	113
Tabela 22 - Parâmetros para análise geoestatística quanto à independência das discrepâncias EN e h	119
Tabela 23 – Desvios padrão e RMSE verificados automaticamente nas posições dos pontos de apoio e detectados no ortomosaico e MDT dos sensores Canon 600D, Canon ELPH 110S e Sequóia processados pela técnica SfM	122
Tabela 24 - Componentes da variância a priori para inspeção de outliers dos produtos cartográficos digitais oriundo de imagens dos sensores Canon 600 D, Canon ELPH 110 S e Sequóia	130
Tabela 25 - Desvio padrão a priori e inspeção de outliers nas discrepâncias horizontais e verticais dos produtos cartográficos digitais	131
Tabela 26 - Diferenças entre as coordenadas UTM 22S, no SIRGAS 2000, dos pontos de checagem GNSS e do ortomosaico e MDT _{RPAS} da UHE Bariri, SP (Canon 600 D + SfM) ..	133
Tabela 27 - Diferenças entre as coordenadas UTM 22S, no SIRGAS 2000, dos pontos de checagem GNSS e do ortomosaico e MDTRPAS do Lago Unisinos (Canon ELPH 110 S + SfM).....	134
Tabela 28 - Diferenças entre as coordenadas UTM 22S, no SIRGAS 2000, dos pontos de checagem GNSS e do ortomosaico e MDTRPAS do Lago Unisinos (Sequóia + SfM)	135
Tabela 29 - Teste de sequência para as discrepâncias EN do ortomosaico da câmera Canon EOS 600D + SfM, com base nas hipóteses prévias onde $H_0 \geq 0,899$ m e $H_1 < 0,899$ m	144
Tabela 30 - Teste de aleatoriedade para as discrepâncias h do MDT da câmera Canon EOS 600 D + SfM, com base nas hipóteses prévias onde $H_0 \geq -0,405$ m e $H_1 < -0,405$ m	145
Tabela 31 - Teste de aleatoriedade para as discrepâncias EN do ortomosaico da câmera Cano ELPH 110S + SfM, com base nas hipóteses prévias onde $H_0 \geq 0,256$ m e $H_1 < 0,256$ m	146
Tabela 32 - Teste de aleatoriedade para as discrepâncias h obtidas no MDT da câmera Canon + SfM, com base nas hipóteses prévias onde $H_0 \geq 0,282$ m e $H_1 < 0,282$ m.....	147
Tabela 33 - Teste de aleatoriedade para as discrepâncias EN, obtidas através do sensor Sequóia + SfM, com base nas hipóteses prévias onde $H_0 \geq 0,258$ m e $H_1 < 0,258$ m.....	148

Tabela 34 - Teste de aleatoriedade para as discrepâncias h , obtidas através do sensor Sequóia, com base nas hipóteses prévias, onde $H_0 \geq 0,518$ m e $H_1 < 0,518$ m.....	148
Tabela 35 - Resumo com as medidas estatísticas e resultados das análises de hipóteses prévias para as discrepâncias EN e h dos produtos cartográficos dos sensores Canon EOS 600D + SfM, Canon ELPH 110S + SfM e Sequóia + SfM	149
Tabela 36 - Teste t Student para verificação de tendência das discrepâncias EN e h obtidos com Canon EOS 600D + SfM	150
Tabela 37 - Azimutes das discrepâncias EN observados no ortomosaico gerado com	151
Tabela 38 - Azimutes das discrepâncias EN observados no ortomosaico gerado através das imagens da câmera Canon ELPH 110S + SfM	152
Tabela 39 - Azimutes das discrepâncias EN observados no ortomosaico gerado através do Sensor Sequóia + SfM	153
Tabela 40 - Resultados da estatística circular aplicada às discrepâncias EN do ortomosaico Canon EOS 600D + SfM, Canon ELPH 110 S + SfM e Sequóia + SfM	154
Tabela 41 - Resultados dos testes de Rayleigh e de uniformidade das discrepâncias direcionais do ortomosaico Canon EOS 600D+SfM.....	155
Tabela 42 - Valores de referência para o erro padrão (EP) de acordo com o padrão brasileiro de exatidão para produtos digitais.....	156
Tabela 43 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão horizontal EN do ortomosaico para as classes A, B, C e D, na escala 1:2000, do PEC-PCD	157
Tabela 44 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão horizontal EN do ortomosaico para as classes A, B, C e D, na escala 1:5.000, do PEC-PCD	157
Tabela 45 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão na elevação (h) para as classes A, B, C e D, na escala 1:10.000, do PEC-PCD.....	158
Tabela 46 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão do MDT para as classes A, B, C e D, na escala 1:10.000, do PEC-PCD.....	158
Tabela 47 - Resultados do Teste U de Mann-Whitney aplicados aos dados do ortomosaico e MDT obtidos a partir de imagens da câmera Canon ELPH 110S para $Z_{crítico} = 1,96$ ao nível de 95% de confiança	160
Tabela 48 - Resultados do Teste U de Mann-Whitney aplicados aos dados do ortomosaico e MDT a partir de imagens obtidas através do sensor Sequóia para $Z_{crítico} = 1,96$ ao nível de 95% de confiança	160

Tabela 49 - Precisões horizontais e verticais dos produtos cartográficos dos sensores Canon ELPH 110S + SfM e Sequóia + SfM, de acordo com o teorema de Chebyshev.....	161
Tabela 50 - Medidas estatísticas da verificação de exatidão do MDT _{RPAS} (Canon EOS 600D + SfM).....	163
Tabela 51 - Resumo das medidas estatísticas descritivas das discrepâncias (h) verificadas no MDT _{RPAS} e resultados dos testes de independência, normalidade e aleatoriedade	167
Tabela 52 - Resultado do Teste t Student para verificação de tendência das discrepâncias (h) entre MDT _{RPAS} e MDT _{controle}	167
Tabela 53 - Valores de referência para o erro padrão (EP) de acordo com o padrão brasileiro de exatidão para altimetria e MDT de produtos digitais nas escalas 1:5000 e 1:10.000.....	168
Tabela 54 – Teste de Qui quadrado para análise de exatidão de altimetria (h) para as classes A, B, C e D, na escala 1:5.000, do PEC-PCD	168
Tabela 55 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão altimétrica (h) para as classes A, B, C e D, na escala 1:10.000, do PEC-PCD	169
Tabela 56 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão do MDT _{RPAS} nas classes A, B, C e D, com escala 1:5.000, do PEC-PCD	169
Tabela 57 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão do MDTRPAS nas classes A, B, C e D, na escala 1:10.000, do PEC-PCD	170
Tabela 58 - Medidas estatísticas descritivas para EN, h e MDT _{RPAS} (Canon EOS 600D + SfM) (Amostra Aleatória).....	170
Tabela 59 - Teste t Student para verificação de tendência das discrepâncias (h) e MDT _{RPAS}	172
Tabela 60 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão da altimetria (h) do MDT _{RPAS} para as classes A, B, C e D, na escala 1:5.000, do PEC-PCD	172
Tabela 61 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão altimétrica (h) do MDT _{RPAS} para as classes A, B, C e D, na escala 1:10.000, do PEC-PCD	173
Tabela 62 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão do MDT _{RPAS} nas classes A, B, C e D, na escala 1:5.000, do PEC-PCD	173
Tabela 63 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão do MDT _{RPAS} nas classes A, B, C e D, na escala 1:10.000, do PEC-PCD	173

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas
ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica
ANSI - *American National Standards Institute*
ASLMS – *American Society Laser Medical Surgery*
ASPRS – *American Society Photogrammetry and Remote Sensing*
BDG – Banco de Dados Geográficos
CBERS – *China-Brazil Earth-Resources Satellite*
CONCAR – EB – Conselho Nacional de Cartografia – EB
EMAS - *Engineering Map Accuracy Standard*
ET-ADGV – Especificação Técnica – Aquisição de Dados Geográficos Vetoriais
FEMA - *Federal Emergency Management Agency*
FGDC – *Federal Geographic Data Committee*
GNSS – *Global Navigation Satellite System*
GPS-RTK – *Global Positioning System – Real Time Kinematic*
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INDE - Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
ISO - *International Organization for Standardization*
MDE – Modelo Digital de Elevação
MDS – Modelo Digital de Superfície
MDT – Modelo Digital do Terreno
MMQ – Método dos Mínimos Quadrados
NDEP - *Nevada Division of Environmental Protection*
NMAS – *National Map Accuracy Standard*
NMM – Nível Máximo *Maximorum*
NOAA - *National Oceanic & Atmospheric Administration*
NR – Norma Reguladora
NSSDA - *National Standard for Spatial Data Accuracy*
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico
PEC – Padrão de Exatidão Cartográfico
PEC – PCD – Padrão de Exatidão Cartográfica – Produtos da Cartografia Digital

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens

PPP – Posicionamento por Ponto Preciso

RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

RMSE – *Root Mean Square Error*

RPAS – *Remotely Piloted Aerial System*

SCG – Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração

SfM – Structure from Motion

SIRGAS – Sistema Internacional de Referência Geocêntrico para a América do Sul e Caribe.

SNIRH – Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos

UHE – Unidade Hidroelétrica

USACE – *United States Army Corps Enginneer*

USGS – *United States Geology Service*

UTM – Universal Transversa de Mercator

UAV – Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	23
1.1	Hipótese.....	26
1.2	Objetivos	26
1.3	Objetivos Específicos	26
2.	RESERVATÓRIOS DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E NORMAS VIGENTES.....	27
3.	ESTRUTURA DO SENSORIAMENTO REMOTO COM VEÍCULOS AÉREOS REMOTAMENTE PILOTADOS.....	32
3.1	Sensoriamento Remoto.....	32
3.2	Sistemas de Veículos Aéreos Remotamente Pilotados	33
3.3	Sistemas de Navegação, Orientação e Controle em RPAS	35
3.4	Sensores Remotos.....	37
3.5	Cartografia Digital a partir de sensores embarcados em veículos aéreos remotamente pilotados	39
3.5.1	Planejamento	41
3.5.2	Aquisição de Dados	42
3.5.3	Georreferenciamento Indireto	45
3.5.4	Modelagem Baseada na Imagem e Renderização	46
3.5.5	Exatidão de Produtos Cartográficos da Fotogrametria com Sensores Embarcados em RPAS.....	53
4.	QUALIDADE DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS	58
4.1	Aspectos Estatísticos da Exatidão Posicional	62
4.2	Pontos de Controle	63
4.2.1	Amostragem de Pontos de Checagem.....	64
4.2.2	Espacialização dos Pontos de Checagem.....	71
4.2.3	Feições Lineares de Controle	72
4.3	O MDT de Controle	73
4.4	Estimadores Robustos	74
4.4	Valores Atípicos e o Erro Esperado	76

4.5 Hipóteses Prévias	77
4.5.1 Teste de Independência das Discrepâncias Amostras	78
4.5.2 Teste de Normalidade para As Amostras de Discrepâncias	80
4.5.3 Teste de Aleatoriedade para as Amostras de Discrepâncias.....	81
4.6 Medidas Estatísticas Descritivas	83
4.7 Erros Sistemáticos e Estimativa do Nível de Incerteza	84
4.7.1 Análise de Tendência por Meio do Teste t-Student	85
4.7.2 Estatística Circular.....	87
4.7.2.1 Teste de Significância da Estatística Circular.....	91
4.7.2.2 Teste de Uniformidade para Estatística Circular	91
4.7.2.3 Teste de Aleatoriedade	92
4.8 Análise de Precisão por Meio do Teste Paramétrico Qui quadrado.	93
4.9 Análise de Precisão por Meio do Teste Não Paramétrico (U) de Mann-Whitney.....	93
4.10 Principais Padrões de Exatidão Cartográfica Digital.....	95
4.10.1 Padrões para Exatidão do MDT.....	99
4.10.2 Padrão de Exatidão Cartográfica Brasileiro	103
5. ÁREAS DE ESTUDO	106
5.1 UHE Álvaro de Souza Lima	106
5.2 Lago UNISINOS.....	107
6. MATERIAIS E MÉTODOS.....	108
6.1 Aquisição de Imagens	108
6.2 Determinação de Pontos de Controle.....	111
6.3 Processamento de Imagens	113
6.4 Análise da Exatidão Posicional.....	114
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	122
7.1 Produtos cartográficos digitais.....	122
7.2 Variância a Priori, Discrepâncias e Inspeção de Outliers dos Produtos Cartográficos Digitais.....	130
7.3 Verificação das Hipóteses Prévias para as Discrepâncias EN e h dos Produtos Cartográficos Digitais	136
7.3.1 Teste de Independência das Discrepâncias EN e h.....	136

7.3.1.1. Dos produtos do Sensor Canon EOS 600D + SfM	136
7.3.1.2 Dos produtos da Canon ELPH 110 S + SfM	138
7.3.1.3 Dos produtos do sensor Sequóia + SfM.....	139
7.3.2 Teste de Normalidade das Discrepâncias Horizontais e Verticais.....	141
7.3.3 Teste de Aleatoriedade das Discrepâncias EN e h.....	144
7.3.3.1 dos Produtos do Sensor Canon EOS 600D + SfM.....	144
7.3.3.2 Dos Produtos dos Sensores Canon ELPH 110 S + SfM	145
7.3.3.3 Dos Produtos do Sensor Sequóia + SfM.....	147
7.4 Verificação de erros sistemáticos para os Produtos Cartográficos Digitais.....	150
7.4.1 Teste t Student.....	150
6.4.2 Análise Direcional das discrepâncias horizontais	151
7.5 Exatidão dos Produtos Cartográficos Digitais.....	156
7.5.1 Teste Qui Quadrado aplicado ao Ortomosaico e MDT da Canon EOS 600D + SfM e confrontação com PEC-PCD.....	156
7.5.2 Teste U Mann-Whitney aplicado aos ortomosaicos e MDTs Canon ELPH 110 S + SfM e Sequóia + SfM	159
7.6 Verificação da Exatidão do MDT _{RPAS} com referência em MDT _{controle}	162
7.6.1 Verificação da Exatidão por Meio de Pontos Amostrados em Malha Regular	163
7.6.1.1 Verificação das Hipóteses Prévia para a Amostragem Regular sobre o MDT Canon EOS 600D + SfM	165
7.6.1.2 Teste de Independência das Discrepâncias (h) Verificadas por Meio de MDT de Controle.....	165
7.6.1.3 Teste de Normalidade	166
7.6.1.4 Testes de Inferência para a Amostragem Regular sobre MDT _{RPAS} Canon EOS 600D + SfM.....	167
7.6.1.5 Análise da Exatidão Vertical e do MDT Canon EOS 600D + SfM (Amostragem Regular).....	168
7.6.2 Exatidão do MDT _{RPAS} por Meio de Amostragem Aleatória.....	170

7.6.2.1	Verificação de Hipóteses Prévias da Componente (h) da Amostragem Aleatória sobre MDT_{RPAS} e $MDT_{Controle}$	171
7.6.2.2	Testes de Inferência para a Amostragem Aleatória sobre MDT_{RPAS} Canon EOS 600D + SfM	171
7.6.2.3	Análise da Exatidão Vertical e do MDT Canon EOS 600D + SfM (Amostragem Aleatória)	172
8.	CONCLUSÕES	178
9.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	180
10.	REFERÊNCIAS	181
	Anexo 1 - Roteiro de Testes Estatísticos	192
	Anexo 2 - Limites máximos estimados para o parâmetro de concentração k, para valores calculados de R médio	196
	Anexo 3 - Rotina para Verificação da hipótese Prévia e determinação de medidas estatísticas	197
	Anexo 4 - Elevações extraídas da malha regular 30 x 30 m alocadas nas seções transversais e a diferença entre elas no MDT-controle e MDT-RPAS	198
	Cont. Anexo 4 - Elevações extraídas da malha regular 30 x 30 m alocadas nas seções transversais e a diferença entre elas no MDT-controle e MDT-RPAS	199
	Cont. Anexo 4 - Elevações extraídas da malha regular 30 x 30 m alocadas nas seções transversais e a diferença entre elas no MDT-controle e MDT-RPAS	200
	Anexo 5 - Teste de hipótese de normalidade e medidas estatísticas para as 100 simulações da amostragem aleatória	201
	Cont. Anexo 5. Teste de hipótese de normalidade e medidas estatísticas para as 100 simulações da amostragem aleatória.	202

1. INTRODUÇÃO

As áreas adjacentes às represas de água de usos múltiplos correspondem às áreas desapropriadas no momento da construção da barragem, geralmente limitada por uma linha imaginária, correspondente a cota de desapropriação. Essa cota corresponde ao nível máximo *maximorum*, que a superfície da água pode atingir devido às manobras de operação em reservatórios de acumulação. A área desapropriada corresponde a faixa entre essa cota e a cota normal e visa garantir a segurança de operação.

O mapeamento destas áreas pode ter diversas finalidades, entre elas, identificação de mudanças no terreno decorrente de ações antrópicas de movimentação de terra, de expansão urbana ou de evolução de áreas de remanescentes florestais e de culturas agrícolas; e avaliação dos dados topográficos para construção da curva cota versus área versus volume para gerenciamento do aproveitamento hidroelétrico juntamente com o mapeamento batimétrico da área molhada. Além disso, à jusante da barragem, o mapeamento visa identificar as cotas alcançadas pelas ondas de cheia em caso de abertura de comportas, ou eventualmente, em caso de rompimento da barragem.

Cabe ressaltar que o mapeamento é necessário para atendimento às legislações vigentes e demandas fundiárias. A técnica mais utilizada para o mapeamento das faixas adjacentes às represas é o sensoriamento remoto por meio de sensores aéreos e orbitais.

A aerofotogrametria requer que se realize um voo com sobreposição de imagens fotográficas de modo a se ter a estereoscopia. Essa condição é necessária para se ter um modelo tridimensional da área mapeada e, assim, definir as altitudes de desapropriação. No método convencional, o voo é realizado com avião e câmeras métricas de alta resolução, em linhas planejadas para garantir um recobrimento mínimo de 60% longitudinal e 30% lateral e as imagens são tomadas o mais vertical possível para garantir a confiabilidade de escala.

Além do voo, realiza-se a determinação de coordenadas dos pontos de apoio no solo para melhorar a exatidão dos modelos digitais gerados a partir dessas imagens, por meio de topografia terrestre ou posicionamento global por satélite.

Na última década, popularizou-se o uso de veículo aéreo remotamente tripulado ou *remotely piloted aerial system* (RPAS) para imageamento terrestre, no qual inclui os veículos de asa fixa e com rotores, também conhecidos como drones. Esses veículos voam a baixa altitude e transportam sensores remotos e sistemas de navegação a bordo. Consistem num

método alternativo para mapeamento cartográfico, no entanto, há poucos estudos sobre a qualidade dos produtos que entregam.

Os vôos são previamente planejados para um recobrimento lateral e longitudinal superior a 60%. Essa sobreposição é necessária para garantir o bom desempenho dos softwares de processamento, pois no caso dos veículos de asa fixa, os movimentos são influenciados pela ação dos ventos o qual impossibilita a tomada de fotografias com a câmera no nadir, por consequência, a escala é muito variável e podem ocorrer falhas de recobrimento.

O georreferenciamento da nuvem de pontos, por meio de pontos de apoio, melhora a exatidão dos produtos gerados com imagens de alta resolução coletadas através de RPAS, uma vez que pelo menos quatro pontos nas extremidades são necessários para realização da transformação de Helmert.

A verificação da exatidão horizontal e vertical para validar os produtos para uso cartográfico é feita por meio de comparação do produto cartográfico gerado com imagens coletadas através de RPAS com uma fonte 2 a 3 vezes mais precisa, podendo ser usados pontos, linhas e modelos digitais como elementos de checagem.

No Brasil, ainda é muito recente a fotogrametria aérea por meio de RPAS e não há uma sistematização do processamento e da verificação da qualidade dos produtos gerados. Tem-se como referência o Decreto-Lei nº 89.817, de 20 de junho de 1984, complementado pela Especificação Técnica dos Produtos dos Conjuntos de Dados Geoespaciais em 2011 (ET-PCDG, 2011), resultando no Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), no qual classifica os produtos em função da escala. Como a maioria dos padrões de exatidão, o PEC-PCD parte da premissa que os dados cumprem a função de probabilidades gaussianas e, desta forma, a qualidade do produto pode ser verificada pelos estimadores da estatística clássica, através do uso da média e do desvio padrão.

Quando os dados se distribuem de forma livre, ou seja, não cumprem a função de distribuição normal, os testes paramétricos devem ser substituídos por testes não paramétricos. E, estimadores robustos devem ser adotados para verificação da qualidade. Esses estimadores são menos sensíveis a variabilidade de dados e, por isso, são mais fáceis de aplicar. Mas requerem maior conhecimento por parte do especialista na tomada de decisão sobre a exatidão do produto cartográfico.

Este trabalho é constituído de oito seções. Na primeira seção apresenta-se a introdução, a hipótese da pesquisa e os objetivos gerais e específicos. Na segunda seção,

incia-se a revisão bibliográfica sobre reservatório de hidroelétrica e mapeamento das áreas de concessão e servidão para implantação e atualização cadastral de plantas de geração de energia elétrica, bem como, as técnicas vigentes e as legislações brasileiras pertinentes.

Na terceira seção, apresenta-se a revisão bibliográfica sobre a estrutura do sensoriamento remoto com veículos aers remotamente pilotados (RPAS), os principais componentes de um sistema RPAS, sensores imageadores e, também, alguns trabalhos de fotogrametria através de RPAS aplicados na análise de dados qualitativos e quantitativos.

A quarta seção, traz uma revisão sobre qualidade de produtos cartográficos no que se refere a exatidão geométrica destes produtos, tais como, os principais elementos de controle, detecção de valores atípicos e erros sistemáticos, os testes de hipóteses prévias e uma breve apresentação dos principais padrões de exatidão, entre eles, o padrão brasileiro, PEC-PCD.

Na quinta seção, são apresentadas as áreas de estudo. E, na sexta seção, a metodologia empregada na pesquisa é descrita desde a aquisição e processamento de dados, passando pelas etapas de testes estatísticos para análises de hipóteses prévias, até a aplicação de testes paramétricos e não paramétricos para verificação da exatidão geométrica.

Na sétima seção, são apresentados os resultados dos dois estudos de caso: um estudo feito num trecho adjacente à represa Álvaro de Souza Lima, localizada no Rio Tietê, no município de Bariri - SP, e, outro estudo, realizado no entorno de uma pequena represa localizada no campus da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, na cidade de São Leopoldo, RS. Também são apresentados os resultados e as análises de exatidão geométrica de ambos os estudos, sendo que, para o primeiro estudo foram aplicados testes paramétricos e, para o segundo, testes não paramétricos, ambos em acordo com a aceitação ou não da hipótese prévia de normalidade das discrepâncias observadas nos pontos de controle.

Na oitava seção, são relatadas as conclusões referentes à metodologia aplicada, os resultados alcançados e a aplicabilidade do ortomosaico e MDT, para geração de mapas cadastrais para atendimento das principais legislações que os operadores de energia elétrica devem cumprir. E por último, na nona seção, são feitas recomendações para trabalhos futuros.

1.1 Hipótese

O mapeamento a partir da cartografia digital com dados adquiridos com sensores imageadores embarcados em sistemas aéreos remotamente pilotados (RPAS) atende aos padrões de exatidão geométrica exigidos pelos órgãos gestores de reservatórios de UHE (Unidade Hidroelétrica).

1.2 Objetivos

Avaliar o padrão de exatidão horizontal e vertical de produtos fotogramétricos gerados a partir de sensores remotos embarcados em RPAS.

1.3 Objetivos Específicos

- Sistematizar uma metodologia para avaliação de exatidão geométrica com base na distribuição normal dos dados, como previsto nos principais padrões de exatidão cartográfica e considerando a não normalidade dos dados.
- Avaliar a qualidade geométrica de produtos cartográficos produzidos a partir de imagens coletadas com sensores embarcados em RPAS de asa fixa e hexarotor, processadas pelo método SfM.

2. RESERVATÓRIOS DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E NORMAS VIGENTES

O propósito de um barramento de água é definido legalmente e prioritariamente à sua construção. Posteriormente, propósitos adicionais podem ser inclusos, substituídos ou excluídos, de acordo com a demanda e as condições estruturais do reservatório. Dos propósitos do reservatório derivam as regras operacionais para atenuar os conflitos, principalmente no período de estiagem crítica. Tanto os propósitos como as regras são afetados por fatores sociais, econômicos, ambientais e políticos (CONSOLI; MATARAZZO; PAPPALARDO, 2008).

Nos Estados Unidos, no século XIX, a legislação para reservatórios previa apenas o propósito de navegação. Posteriormente, novos propósitos foram estabelecidos, sendo que dois destes propósitos eram o planejamento e o gerenciamento, regidos por uma lei geral para o uso principal e para autorizações de usos adicionais. Na Figura 1, é apresentada uma ilustração da compartimentação de uma barragem. O armazenamento de água em reservatório é subdividido tipicamente por três compartimentos: de propósito exclusivo, de multipropósitos e de volume morto.

Figura 1 - Seção típica de armazenamento de água nos reservatórios

Fonte: USACE, 1997.

O compartimento de propósito exclusivo destina-se à contenção de cheias, no entanto, se este uso não ocorrer na maior parte do tempo pode empregado para atrair atividades de recreação. O compartimento para multipropósitos deve garantir os usos em períodos

hidrológicos de cheia e seca, como produção de energia elétrica, navegação e suprimento de água. Já, a capacidade inativa ou volume morto, é a região de deposição de sedimentos, porém consiste numa reserva de água estratégica nos períodos de extrema estiagem (USACE, 1997).

O reservatório é a região delimitada desde sua parte mais profunda até o nível *maximorum* onde se distinguem três elementos: contorno (isóbata da altitude da lâmina d'água), área molhada e área seca do reservatório. Também se distinguem três partes: o corpo, os braços e os canais do reservatório, e/ou ainda, região de águas profundas e região de águas rasas, sendo essa última representada pelas áreas próximas ao contorno e braços de reservatório. Na região de águas rasas ocorre a maior parte das deposições de sedimentos, o que torna difícil a coleta de dados por técnicas convencionais (ESTIGONI; MATOS; MAUAD, 2012). Na Figura 2, é apresentada a superfície da área de inundação na cota máxima *maximorum* do Reservatório da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) de Mogi-Guaçu no Estado de São Paulo e na Figura 3, a planta baixa das instalações dessa PCH (FIPAI, 2015).

Figura 2 - Superfície do reservatório da PCH de Mogi Guaçu delimitada pela cota máxima *maximorum*

Fonte: FIPAI, 2015.

A área superficial delimitada pela cota máxima *maximorum* de operação e áreas ocupadas pelas edificações são objetos de mapeamento para atendimento às regras de cadastro das instalações e das áreas concedidas para geração de energia hidroelétrica.

A base cartográfica de um reservatório consiste no conjunto de dados tridimensionais georreferenciados que identificam sua região de influência, sendo representada por um modelo digital do terreno. Pode ser obtida antes do enchimento do reservatório, através de cartas topográficas, de levantamentos topográficos e fotogramétricos, de perfilamento a laser, de interferometria radar ou de sensoriamento remoto; e/ou ainda, após o enchimento do reservatório, por técnicas de topobatimetria. Para a atualização da base cartográfica, se distingue três etapas, sendo elas, os levantamentos: do contorno, da área molhada e da área seca do reservatório (ANA, 2013).

A linha de contorno do reservatório pode ser obtida por levantamentos topográficos, laser ou aerofotogrametria, com escala igual ou superior a 1:20.000 georreferenciados a *datum* vertical e horizontal, por ex., através do Sistema Internacional Geodésico das Américas, SIRGAS 2000 (Imbituba). Atualmente, as imagens Landsat 8 com resolução de 30 m estão disponíveis livremente no portal do INPE. Novas tecnologias têm surgido com resolução de até 0,50 metros, como imagens *Quickbird*, plêiades (Astrium®) e IKONOS, a um custo que tende a se reduzir com a expansão do seu uso. ANA (2013) cita que métodos alternativos de aquisição de dados são aceitos desde que comprovada a sua exatidão, porém não explicita quais são os métodos de comprovação da exatidão.

O sistema de posicionamento GNSS/RTK está consolidado em levantamentos topobatimétricos, pois apresenta alta qualidade de posicionamento horizontal e propicia a correção de marés no posicionamento vertical e a estabilidade no sinal com a embarcação em movimento para bases curtas (RAMOS et al., 2007; JOHNSON; ANDERSEN; SEBREE, 2008). A tecnologia de posicionamento por satélite atualmente empregada no Brasil é atendida pelo sistema GPS e GLONASS. Outras estão sendo implantadas, como o GALILEO (Europeu) e COMPASS BEIDOU (Chinês) (MONICO, 2008).

No levantamento da área molhada empregam-se ecosondas monofeixe e multifeixe (JOHNSON; ANDERSEN; SEBREE, 2008; DEBESE; SEUBE; HEYDEL, 2012). No entanto, para locais com profundidade inferior a 1,5 metros, o uso do ecobatímetro é limitado devido a restrição operacional do equipamento ou dificuldade de acesso à embarcação por falta de calado. Alternativas para o mapeamento de áreas rasas são o levantamento

planialtimétrico convencional ou por satélite (GNSS) (que em grandes reservatórios seria bastante custoso) e a fotogrametria aérea com imagens de alta resolução. Nas imagens, o valor da radiância captada pelo sensor é convertido analiticamente em valor de profundidade (KRUG; NOEMBERG, 2005; ZANI; ASSINE; SILVA, 2009). Além dessas alternativas, pode-se conseguir melhorias no MDT com a inserção de malha de pontos antes de se executar a interpolação (MATOS, 2012).

No Brasil, os operadores de energia elétrica estão sujeitos às regras para manutenção da outorga de operação. A Política Nacional de recursos hídricos, Lei Federal 9433/97, atribui ao Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, SNIRH, a manutenção das informações fluviométricas e sedimentométricas dos volumes outorgados. Assim, a Agência Nacional de Águas, ANA, e a Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, elaboraram uma resolução conjunta (ANEEL; ANA, 2010) para que os operadores fornecessem e mantivessem atualizadas as informações referentes às suas estações de monitoramento linométrico e sedimentométrico, bem como, de qualidade da água. Entre essas informações, a curva cota x área x volume deve ser atualizada periodicamente e a ANA elaborou um roteiro com as técnicas de campo e laboratório para construção dessa curva. Cabe enfatizar que, neste roteiro, a ANA admite o uso de técnica alternativa de mapeamento desde que o produtor da informação comprove sua exatidão.

Além das informações necessárias para manutenção da outorga, de acordo com a Lei Federal 8987/1995, os operadores deverão manter atualizados o inventário e os bens vinculados à concessão (BRASIL, 1995a). A Superintendência de Concessões e Autorização de Geração, SCG, identificou que, de modo geral, os agentes mais antigos não dispunham de material cartográfico ou eram materiais esparsos, de abrangência distinta, com formatos diversos e em pequena escala, por ex., 1:50.000, e muitas vezes, sem georreferenciamento.

O limite de áreas de terra necessárias à implantação de instalações de geração e de transporte de Energia Elétrica, por concessionários, permissionários e autorizados, requerido no momento da solicitação da Declaração de Utilidade Pública, DUP, deverá ser demarcado sobre uma planta planialtimétrica com escala suficiente para visualizar todos os elementos do desenho e que atenda aos padrões cartográficos vigentes (ANEEL, 2016). Essa planta pode ser gerada por meio de imagens de satélite ortorretificadas, restituição/interpretação a partir de pares estéreos ou levantamento aéreo, todos com resolução espacial de até 1,0 m, perfilamento laser, restituição de imagens de radar e levantamento topográfico

planialtimétrico cadastral.

Quanto ao licenciamento ambiental prévio, o enunciado no parágrafo IV da Resolução ANEEL 259/2003 define, no inciso III do art. 4º da Lei Federal 12.651/12, modificada pela Lei Federal 12.727/2012, as áreas de preservação permanente no entorno dos reservatórios artificiais de água, decorrentes de barramento ou represamento de cursos d'água naturais, como sendo a faixa definida na licença ambiental do empreendimento (BRASIL, 2012). Estas áreas consistem numa faixa demarcada entre a cota normal e a cota máxima normal sobre uma planta planialtimétrica. Como função da declividade do terreno, elas possuem largura variável e podem ficar reduzida a poucos metros.

A Política Nacional de Segurança de Barragens, PNSB (Lei Federal 12.334/2010), visa minimizar os riscos de acidentes e suas consequências através do cumprimento de padrões de segurança em barragens. O Plano de Segurança de Barragem e as ações a serem adotadas são de responsabilidade do agente público ou privado que detém o direito real de uso das terras onde a barragem se localiza (BRASIL, 2010). Assim, as barragens são classificadas quanto ao risco potencial de um dano decorrente do seu rompimento. Esta lei não possui resolução normativa para orientar os agentes quanto à documentação cartográfica mínima para assegurar um nível mínimo de confiança nas informações.

Na Tabela 1 são apresentados os principais aspectos cartográficos para geração e manutenção das informações necessárias para que os operadores de energia elétrica atendam à legislação brasileira.

Tabela 1 - Principais aspectos cartográficos para geração e manutenção de informações para que operadores de energia elétrica atendam à legislação brasileira

Lei / Resolução	Aspecto Cartográfico
Política Nacional de Recursos Hídricos - Lei Federal 9433/1997 (BRASIL, 1997)	Informações sobre os volumes outorgados, no caso de reservatórios, refere-se a planta topobatimétrica e os níveis operacionais.
Resolução conjunta 003/2013 ANA ANEEL	Avaliação do processo de assoreamento dos reservatórios através da atualização da curva cota x área x volume. Planta topobatimétrica.
Orientações para atualização das curvas cota x área x volume (ANA 2013)	Requisitos mínimos para elaboração da planta topobatimétrica para construção e atualização da curva cota x área x volume. Admite método alternativo de mapeamento desde que o produtor da informação comprove a sua exatidão.

Política Nacional de Segurança de barragens – Lei Federal 12.334/2010	A responsabilidade do operador de energia elétrica pelos danos em caso de rompimento da barragem. Requer mapeamento em grande escala da área à jusante da barragem com identificação detalhada do relevo e usos do solo.
Lei Federal 8987/1995 (BRASIL, 1995b)	Manter atualizado o inventário de concessão.
Resolução ANEEL 740/2016 Declaração de Utilidade Pública	- Áreas que serão desapropriadas para concessão, na escala mínima que possa identificar todos os desenhos dos equipamentos a serem instalados.
Resolução Normativa ANEEL 501/2012 (ANEEL, 2012)	Requisitos mínimos para elaboração de plantas cadastrais das áreas de concessão. Admite o sensoriamento remoto com resolução mínima de 1 m e escala de fotointerpretação 1:10.000.
Lei Federal 12.651 e 12.757 de 2012 – Lei Florestal	Desapropriação de áreas de servidão ambiental para instalações.
Decreto-Lei 89.817/1984 e ET-PCDG 2011	Padrão de Exatidão Cartográfica para produtos analógicos e modificada em 2011 para produtos digitais.

Os produtos cartográficos apresentados a ANA/ANEEL devem atender ao padrão de exatidão cartográfica do Brasil, PEC (Decreto-Lei nº 89.817, de 20 de junho de 1984, das Normas Técnicas da Cartografia Nacional), para produtos analógicos e a Especificação Técnica dos Produtos dos Conjuntos de Dados Geoespaciais de 2011 (ET-PCDG, 2011), que complementou a primeira com relação a dados digitais, denominada PEC-PCD (BRASIL, 1984).

3. ESTRUTURA DO SENSORIAMENTO REMOTO COM VEÍCULOS AÉREOS REMOTAMENTE PILOTADOS

3.1 Sensoriamento Remoto

A Fotogrametria e o sensoriamento remoto são a arte, ciência e tecnologia de se obter informação confiável sobre objetos físicos e do ambiente, por meio de processo de registro, medição e interpretação de imagens e de representações digitais dos padrões de energia derivados de sistemas sensores, sem contato físico (COLWELL, 1997).

O conceito de sensoriamento remoto independe da distância entre o sensor e o objeto detectado, isso significa dizer que qualquer instrumento que colete informação sobre um

objeto ou fenômeno, dentro do campo de visada instantâneo (IFOV) do sistema sensor sem estar em contato direto com ele, seja a poucos metros do solo e ou a bordo de uma aeronave ou satélite é sensoriamento remoto. A Figura 3 mostra diferentes tipos de plataformas de sensoriamento sob um determinado campo de visada instantâneo. O RPAS enquadra-se como plataforma suborbital e introduz-se no campo fotogrametria de curta distância (EISENBEISS, 2009; REMONDINO et al., 2011; COLOMINA; MOLINA, 2014).

Figura 3 - Plataformas de sensoriamento remoto e campo de visada instantâneo (IFOV)

Fonte: Jensen, 2011.

3.2 Sistemas de Veículos Aéreos Remotamente Pilotados

Os veículos aéreos recebem várias denominações: veículo aéreo não tripulado (VANT), ou seus anacrônicos, UAS (Unmanned Aerial System), UVA (Unmanned Vehicles Aerial), drones, em referência ao ruído produzido pelos veículos multirotores, e ainda, sistema

aéreo remotamente pilotado, RPAS (Remoted piloted aerial system) (EISENBEISS, 2009).

A evolução do sensoriamento remoto com aplicação de veículos aéreos tripulados e não tripulados foi relatada por Colomina e Molina (2014). No Brasil, aplicações de veículos aéreos não tripulados são bastante recentes e, entre as experiências brasileiras, cabem destacar a construção de RPAS com finalidade de usos civis, como por exemplo, o projeto ARARA (1999), da parceria do ICMC da EESC – USP com a EMBRAPA e a AGX e projeto Gralha Azul – EMBRAPA (2003), com múltiplos sensores para imageamento geográfico, supervisão de linhas de transmissão de energia elétrica, oleodutos, gasodutos e sistema geofísico para mapeamento de elementos metálicos no solo e subsolo (MUNARETTO, 2015).

Um UAS ou RPAS é um sistema que compreende uma série de subsistemas. Estes subsistemas incluem o veículo aéreo em si, o dispositivo de lançamento de veículos (se aplicável), a estação de controle (terrestre, marítima ou aérea) e a carga útil do sensor (*payload*), que se refere à capacidade de carga do veículo para embarcar dispositivos como câmeras, receptores de navegação e orientação (GERTLER, 2012). Na Figura 4, é mostrado um RPAS e os componentes embarcados.

Figura 4 - Componentes embarcados num RPAS tipo hexarotor

Fonte: Lopes, 2015.

Assim, os RPAS podem ser classificados quanto ao *layout* (asa fixa ou rotores), ao peso e altitude que operam. Quanto à altitude, os sistemas podem ser de baixa, média e alta altitude. Os sistemas de baixa altitude (150 a 200 m) voam abaixo da zona do tráfego aéreo e são de fácil operação, desde que dentro do limite da faixa de visão do operador, o que limita a área coberta e o tempo da missão (COLOMINA; MOLINA, 2014).

Câmeras digitais de alta resolução e lasers scanners embarcados em RPA apresentam estabilidade suficiente para extração de informações minuciosas do relevo, como por exemplo, mudanças ocorridas em sítios arqueológicos e áreas de deposição de sedimentos (LAMBERS et al., 2007; LANGHAMMER et al., 2017). Outros instrumentos incluem sensores termais com amostragem multi ou hiperespectral, miniaturas de RADAR, radiômetros passivos de micro-ondas (SUGIURA; NOGUCHI; ISHII, 2007; CHEN et al., 2017).

Os sistemas de médias e altas altitudes têm pouco uso para a comunidade civil e científica. Os veículos são projetados para operar no mesmo espaço aéreo que aeronaves comerciais. Alguns sistemas militares são projetados para estas altitudes e apresentam grande resistência, o que seria interessante para levantamentos de uma grande área.

Na Bélgica, os RPAS de uso militar (*B-hunters*) são usados no monitoramento contínuo das águas territoriais. No Reino Unido, o QinetiQ tem autonomia para voo de 54 horas a altitudes superiores a 17,5 Km. O Instituto Flamengo de Pesquisas Tecnológicas coordena, desde o ano de 2000, o projeto Pegasus que visa à aplicação de aeronaves autônomas de grande envergadura para sensoriamento remoto. E a Agência de Projetos de Pesquisas Avançadas, do Departamento de Defesa dos Estados Unidos, iniciou em 2008 o programa Vulture para construção de um veículo aéreo para serviços de inteligência, vigilância e reconhecimento (ISR) e missões de comunicação. É considerado um pseudosatélite capaz monitorar uma área de interesse por 5 anos ininterruptos, utilizando energia solar durante o dia e armazenando para a noite (COLOMINA; MOLINA, 2014).

3.3 Sistemas de Navegação, Orientação e Controle em RPAS

Colomina e Molina (2014) comentam que ao nos referirmos ao campo da fotogrametria e sensoriamento remoto, é necessário se levar em conta dois componentes básicos dos veículos aéreos não tripulados: navegação-orientação e os processos de detecção

utilizados pelos mesmos. O sistema de navegação e piloto automático permite que a aeronave realize um voo autônomo. Cabe ressaltar que, no Brasil, a legislação vigente não autoriza essa prática, requerendo que haja um sistema controlador de solo (ANAC, 2017).

Em um RPAS tradicional, a operação básica do autopiloto consiste na repetida leitura de sua própria posição, velocidade e postura em um espaço de tempo (“tPVA”: *time, Position, Velocity, Attitude*), a partir do Sistema de Navegação (NS), alimentando o Sistema de Controle de Voo e mantendo a sua rota. Já em RPAS utilizados em fotogrametria e sensoriamento remoto, um Sistema de Orientação é adicionado como forma de aperfeiçoar as medidas “tPVA”, possibilitando também possíveis orientações de voo futuras.

Em um cenário ideal, os sensores pertencentes ao Sistema de Navegação de um RPAS (IMU, receptor GNSS, Baroaltímetros e outros presentes) podem ser compartilhados pelo Sistema de Orientação ou os sensores do Sistema de Orientação podem ficar livres para serem explorados. Na prática, na maioria das vezes, o Sistema de Navegação e o Sistema de Orientação trabalham individualmente ou o Sistema de Navegação fornece apenas os parâmetros “tPVA” ao Sistema Operacional. No último caso, o Sistema Operacional possui apenas uma função de entrada e saída de dados simplórios que não serão utilizados pelo seu controle aéreo, mas apenas como uma aproximação inicial para a geração automática de pontos de amarração e as suas respectivas medições fotogramétricas.

Isso ocorre devido ao fato de que o Sistema de Navegação é necessário para fornecer parâmetros “tPVA” em tempo real e sob alta frequência (acima de 1 kHz), que forneçam uma precisão baixa ou moderada, se opondo ao processo estabelecido pelo Sistema Operacional, o qual fornece uma precisão consideravelmente alta enquanto utiliza padrões “tPVA” sob baixa frequência.

Atualmente, o nível de miniaturização de computadores de bordo, receptores GNSS, IMUs e sensores em geral permite a integração de Unidades Híbridas de Mensuramento (HMU) para RPAS mais leves, cujos mensuramentos podem ser processados em tempo real (com a utilização do Sistema Híbrido de Navegação) ou pós-processados (com a utilização do Sistema Híbrido de Orientação), a fim de entregar um parâmetro de posição/orientação a central de comando (REHAK; MABILLARD; SKALLOUD, 2013). Esses resultados são dependentes da qualidade do receptor GNSS e, mais ainda, em relação a qualidade da antena do receptor GNSS (VAN DIGGELEN, 2010).

A precisão da ação do sistema de orientação é altamente dependente da qualidade do IMU

e as condições de voo, variando em um intervalo de 0,015 a 0,2 graus (x,y) e 0,03 a 0,5 graus (z). Um IMU de 0,9 a 1,5 kg garante um cálculo de um “tPVA” com grau geodésico no pós-processamento. Essa categoria de IMUs e INSs é representado pelo Appanix (Trimble), família dos AutoPilots (AP20 e AP40) e Novatel’s MEMS Interface Card (MIC), todos de auto grau como os IMUs, Nothrop-Grumman LN200 ou o KVH 1750. IMAR’S IVEU-FQ pertencem a essa categoria apesar do peso de 1,8 kg.

Para as câmeras fotográficas, a precisão de sua performance é compatível com o Sensor Direto de Orientação (DiSO) em altitudes de 2 cm a 50 metros do nível do solo. O quesito de precisão depende do número de pixels da câmera e da sua forma. Para uma câmera de 14 Mpx, no intervalo de altura mencionado, uma distorção de menos de 0,06 graus já é conhecida, sem levar em conta os erros de precisão do INS/GNSS (COLOMINA; MOLINA, 2014).

Quanto ao sistema de controle, a aeronave é controlada a partir do solo (Estação de Controle Terrestre – ECT), através de links de comunicação. Para vôos mais altos que 150 a 200 metros também é requerida a comunicação com as autoridades de controle do espaço aéreo local. A ECT fornece o espaço de trabalho para o piloto, navegador, operador do instrumento e, usualmente, um comandante da missão. Os dados recebidos pelas ECTs podem ser processados no campo ou enviados para um centro de processamento por meio de telecomunicações, no entanto, os custos podem ser reduzidos quando os dados são armazenados a bordo (EVERAERTS, 2008).

3.4 Sensores Remotos

O RPAS suporta tanto sensores ativos, como passivos. Entre os sensores passivos, as câmeras que operam na região do visível (RGB), de pequeno e médio formato, são mais comuns. Sensores que operam na região do Infravermelho próximo, multiespectrais e hiperespectrais são empregados com fins específicos, por exemplo, na detecção de concentração de água no solo (SILVA et al., 2015) e clorofila (GUIMARÃES et al., 2017). Sensores termais têm sido usados em mapeamentos de vegetação (SUGIURA; NOGUCHI; ISHII, 2007; ZARCO-TEJADA; BERNI, 2012).

Colomina e Molina (2014) sistematizaram vários tipos de câmeras em função do formato, resolução, peso, IFOV, comprimento de onda. Na Tabela 2 é apresentado um resumo

com as principais características dos diversos tipos de sensores.

Tabela 2 - Resumo das principais características dos sensores imageadores (passivos) para RPAS

Tipo de sensor	Resolução (Mp)	Tamanho (mm ²)	Tamanho do pixel (cm)	Peso (kg)	Comprimento espectral (μm)
RGB	16,2 - 80	23,6 x 15 a 53,7 x 40,4	3,9 a 6,0 ¹	0,35 a 1,80	
Multiespectral	1,3 – 1,4	6,66 x 5,32 a 10,2 a 8,3	5,2 a 8,1	0,7 a 0,8	400 – 1050
Hiperespectral	CMOS InGaAs	/ 5,6 x 5,6 9,6 x 9,6	5,5 a 30	0,6 a 1,025	500 – 1700
Termal	640 x 512 640 x 480	10,8 x 8,7 16 x 12, 8	17 e 25	0,07 a 0,105	7,5 – 13,5

*Valores menores para CMOS e maiores para CCD.

Fonte: Colomina; Molina, 2014.

Os lasers scanners podem mapear em linhas paralelas ou simples. O alcance varia de 100 m para o Velodyne, enquanto que para RIEGL, o alcance é de 1000 metros. O peso do sensor varia entre 1 a 2 kg e a resolução angular de 0,01 a 0,125 graus na horizontal e 0,8 a 1,33 graus na vertical. Com relação ao FOV (*Field of view*), observado no campo de visada, varia entre 3,2 a 41 graus na vertical e de 60 a 360 graus na horizontal. Quanto aos radares para RPAS, o IMSAR é o mais adequado em função do peso, 1,58 kg, e opera nas bandas X e ku, com resolução espacial entre 3 e 5 metros (COLOMINA; MOLINA, 2014).

O uso de RPAS para aplicações civis como filmagens, fotografia, fiscalização e imageamento 3D estão sujeitas às regras imputadas pelas autoridades de aviação local. Muitas dessas regulamentações visam a segurança do espaço aéreo. A maior restrição atribuída às aeronaves é que estas não possuem piloto a bordo e, assim, não têm senso e capacidade para evitar um acidente. Dessa forma, as autoridades restringem a operação de RPAS em espaços aéreos segregados, como áreas de teste aéreo, sobre o mar ou a baixas altitudes, onde em muitos países variam entre 150 a 200 metros. Outra faixa vazia do espaço aéreo encontra-se acima de 15 km do solo, no entanto, a aeronave teria que atravessar várias camadas ocupadas por tráfego aéreo (EVERAERTS, 2008).

A Resolução nº 419 de 02 de maio de 2017 instituiu o Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial, RBAC-E 94, na qual apresenta os principais requisitos para aeronaves de uso civil. Tal resolução discrimina as aeronaves não tripuladas quanto ao uso, recreativo e não recreativo; peso e altitude de voo (BRASIL, 2017). Quanto ao peso, as aeronaves foram classificadas em 3 categorias, sendo classe 1 para aquelas cujo peso seja superior a 150 kg, classe 2, entre 25 e 150 kg e classe 3, a partir de 250 gramas até 25 kg.

Aos usuários civis de aeronaves de todas as classes, são exigidas certidões de cadastro e certificados de matrícula, de voo experimental e de aeronavegabilidade, manual do voo, apólice de seguro contra danos a terceiros, documento de avaliação de riscos, autorização do DECEA para uso do espaço aéreo e sistema de pilotagem remota. O piloto remoto de aeronaves das classes 1 e 2, ou o que operar voos acima de 400 pés, deverá portar licença e habilitação expedida pela ANAC e certidão Médica.

A RBAC-E 94 proíbe o transporte de pessoas, animais e artigos perigosos previstos na RBAC 175. No entanto, faz exceção para uso de RPAS na agricultura, horticultura e florestas e para controle de desastres, como deslizamentos de terra. E também, para o uso com fins lucrativos de aeronaves que possuem apenas a Certificação de Aeronave para Voo Experimental (CAVE).

Além do atendimento aos regulamentos previstos na Resolução 429/2017, o usuário deve submeter requerimento ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) para a publicação da NOTAM (*Notice to Airman* – Aviso aos Aeronavegantes) (BRASIL, 2016), à Agência Nacional de Telecomunicação (ANATEL) para a homologação de rádio frequência (*Radio Frequency Identification* - RFID), de acordo com a Resolução nº 506/2008 (BRASIL, 2008), e ao Ministério da Defesa, para garantir a não violação de direitos de privacidade e voos de aeronaves estrangeiras em território nacional. Regras específicas para realização de aerolevantamentos com aeronaves convencionais, previstas no Decreto-Lei 1.177/1971, devem ser observadas pelos executores de fotogrametria através de RPAS (BRASIL, 1971).

3.5 Cartografia Digital a partir de sensores embarcados em veículos aéreos remotamente pilotados

As plataformas de veículos aéreos não tripulados são hoje em dia uma valiosa fonte de dados para inspeção, vigilância, mapeamento e questões de modelagem 3D. Como os RPAs

podem ser considerados como uma alternativa de baixo custo para a fotogrametria aérea clássica tripulada, novas aplicações no domínio de curta distância são introduzidas. Os UAVs rotativos ou de asa fixa, capazes de realizar a aquisição de dados fotogramétricos com câmeras digitais amadoras ou SLR, podem voar em modos manual, semiautomado e autônomo. Após um típico fluxo de trabalho fotogramétrico, os resultados 3D como modelos de superfície digital ou terreno, contornos, modelos 3D texturizados, informações vetoriais, etc., podem ser produzidos mesmo em grandes áreas (NEX; REMONDINO, 2014).

Os procedimentos apresentados por Jensen (2011) para a fotogrametria convencional podem ser adaptados para a fotogrametria aérea por meio de RPAS, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Procedimentos para execução da fotogrametria com RPAS

Fonte: adaptado de Jensen, 2011.

3.5.1 Planejamento

No mapeamento qualitativo, a alta resolução espacial e temporal das imagens é bastante relevante nos trabalhos de fotointerpretação. Alguns exemplos relatados são a análise de processos dinâmicos como as alterações no uso e cobertura do solo, processos erosivos e de sedimentação (LAMBERS et al., 2007; LANGHAMMER et al., 2017), o desenvolvimento vegetativo, estresse hídrico, irrigação e falhas em culturas agrícolas (SILVA et al., 2015; ZARCO-TEJADA; BERNI, 2012), as queimadas de florestas (EVERAERTS, 2008), o monitoramento de tráfego rodoviário e acidentes de trânsito (LUO et al., 2011; KHAN et al., 2016), a presença de clorofila e vegetação em sistemas aquáticos (FLYNN; CHAPRA, 2014; GUIMARÃES et al., 2017) e o mapeamento geomorfológico (LOPES, 2015).

Neste contexto, Zhang et al. (2015) relatam que as imagens de ultra resolução espacial obtidas através de RPAS que operam a baixa altitude, com GSD (*Ground Sample Distance*) de 0,3 a 9 cm, apresentam alta variabilidade espectral e efeitos de perspectivas maiores, trazendo alta complexidade para identificação das feições. Laliberte et al. (2011) desenvolveram um método para analisar dados de vegetação em imagens multiespectrais.

A investigação de atributos quantitativos por meio de fotogrametria com RPAS é relatada nos seguintes casos: investigação arqueológica (LAMBERS et al., 2007; VERHOEVEN, 2013), cálculo de volume de minério (SILVA et al., 2016), definição de limites de parcelas de propriedades (MUMBONE, 2015), detecção de contorno de edificações em mapeamento cadastral (CROMMELINCK et al., 2017) e medição de altura de diques (BAKULA et al., 2017).

Melhoria no MDT é conseguida com alta sobreposição de imagens (maior que 60% lateral e 70% longitudinal). Bakula et al. (2017) apresentaram um estudo sobre a influência da sobreposição lateral e da orientação relativa da fotogrametria com laser scanner embarcado no quadrator *YellowMapper* sobre linhas de diques (Figura 6). Nota-se que uma sobreposição maior do que 70% gerou os melhores resultados para os valores de RMSE para nuvem de pontos processada pelo método ICP (Iterative Closest Point) e, média e desvio padrão C2C (Cloud to Cloud) nas elevações, quando comparados com pontos de controle levantados no campo com GNSS RTK.

Figura 6 - Sobreposição lateral de imageamento com laser scanner embarcado em RPAS

Fonte: Bakula et al., 2017.

Rieak-Zapp e Nearing (2005) realizaram um experimento em um modelo reduzido para gerar MDEs de alta resolução espacial e temporal para fins de monitoramento de erosão do solo. A câmera foi calibrada pelo software BLUH, os pontos homólogos foram identificados por mínimos quadrados e o MDE foi gerado por uma malha regular em um SIG. A precisão vertical foi de 1 a 26 mm. Esses autores recomendam que melhores resultados poderiam ser conseguidos com pontos de controle e estratégias mais avançadas de fusão de imagens para a melhoria da geometria do MDE.

3.5.2 Aquisição de Dados

Os dados a serem adquiridos na fotogrametria através de RPAS consistem nas imagens ou nuvem de pontos gerados através do laser scanner e os pontos de controle do solo (CGP – *Control Ground Point*). As imagens geralmente são oblíquas decorrentes dos movimentos da aeronave durante a coleta. No entanto, graças às técnicas de reconstrução de modelos com base em imagens, a obliquidade das imagens é menos relevante que a sobreposição e a textura.

A textura das imagens capturadas com RPAS afeta a performance dos softwares de processamento. Áreas de textura heterogênea, como é o caso de áreas urbanas, apresentam elementos que são mais facilmente detectados no método SfM. Enquanto que, áreas de textura homogênea e/ou muito reflexivas como superfícies líquidas, torna este método fraco para identificar pontos de amarração. Além disso, a reflexão do sol também influencia no

processamento das imagens, sendo mais indicada a realização do voo em dias nublados e claros ou em horário de sol a pino para evitar o efeito de paralaxe. Recomendam que o voo seja executado em uma área maior a de interesse para que se possam excluir as extremidades, onde ocorrem as maiores distorções (FERREIRA et al., 2013).

A resolução da imagem depende das características da câmera, de como a forma captura as ondas luminosas refletidas pelo objeto (CMOS ou CCD) e da distância focal, altura de voo (JIANG et al., 2017). A relação entre a resolução angular e altura de voo para mapeamento de linhas de transmissão é mostrada na Figura 7.

De acordo com Jiang et al. (2017), para que o comprimento w seja totalmente coberto, o ângulo α em torno de x – roll deve ser menor que a metade de FOV ($\theta/2$) quando pitch (β) é igual a 0. Nota-se que α é o parâmetro mais importante quando θ e w são predeterminados. Entretanto, a altura da trajetória do voo influencia diretamente α como demonstrado pelas Equações 1 e 2.

Figura 7 - Relação entre altura do voo (H), altura do objeto (h) e FOV (w) em função do ângulo horizontal (roll (α)) em imagens oblíquas coletadas através de RPAS

Fonte: Jiang et al., 2017

$$\tan \alpha = \frac{w}{H} \quad (1)$$

$$W = H \cdot \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} + \alpha \right) + \tan \left(\frac{\theta}{2} - \alpha \right) \right) \quad (2)$$

Silva et al. (2015) concluíram que a produtividade do mapeamento (ha/min) é influenciada pela autonomia do voo, da função da energia da bateria ou combustível, da habilidade de operadores e do alcance dos controladores de terra. Apresentam as principais características de voo, dos mosaicos gerados em função da altura e da área recoberta, e a produtividade de aquisição de imagens como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Características da aquisição de imagens com RPAS e produtividade

Área recoberta (ha)	Altura do voo (m)	Recobrimento lateral (%)	Número de voos	Tempo de aquisição (minutos)	Tamanho do pixel (cm)	Produtividade (ha/ min)
490	200	60	4	195'	6	3,16
610	200	40	2	46'	6	13,26
390	400	30	1	17'	13	22,94
430	400	30	1	20'	13	21,50

Fonte: Silva et al., 2015.

Quanto aos pontos de controle de solo, são recomendados para a melhoria da qualidade do MDE. No entanto, o georreferenciamento dos modelos digitais pode ser feito apenas com as coordenadas fornecidas diretamente pelo sistema de navegação do RPAS. Neste caso, os modelos resultantes possuem baixa exatidão posicional.

O georreferenciamento direto é aquele em que a modelagem digital prescinde de pontos de controle de solo. Já o georreferenciamento indireto necessita de pelo menos 3 pontos de controle com posição 3D, sendo melhor 4 pontos a fim de se ter um grau de liberdade durante o ajustamento por mínimos quadrados (GARCÍA, 2002).

Neste sentido, quando o mapeamento tem finalidade qualitativa, o georreferenciamento direto com as coordenadas anexadas no EXIF (*Exchangeable image file format*) da imagem ou de uma tabela descrevendo a localização de cada imagem, pode apresentar exatidão horizontal suficiente para a realização da fotointerpretação, por exemplo, localização de feições na escala 1:10.000. No entanto, a escala vertical é degradada porque depende de boa precisão de posicionamento do sistema de navegação.

Com o georreferenciamento direto no mapeamento de áreas de irrigação fiscalizadas pela ANA entre os estados de Minas Gerais e Bahia, o ortomosaico atingiu precisão horizontal de 10 metros (SILVA et al., 2015). Melhorias no posicionamento são conseguidas

com a implementação de GNSS RTK nas plataformas de voo (KRUIJFF et al., 2014).

3.5.3 Georreferenciamento Indireto

Em fotogrametria, pontos de controle são utilizados para o georreferenciamento de modelos tridimensionais. Esses pontos servem para transformar as coordenadas locais em coordenadas globais em relação a um sistema de referência específico.

No georreferenciamento indireto, pontos de controle são identificados no campo em feições que configurem a imagem e/ou são materializados por meio de alvos de dimensão e cores que possam ser capturados pelo sensor. Assim, os pontos de controle podem ser naturais, existentes na área a ser mapeada; ou artificiais, como alvos implantados na área antes de se realizar o voo. Os pontos de controle naturais são feições facilmente identificadas nas imagens em função da escala do voo, são comuns as quinas de cruzamentos de vias, tampões de poços de visita, quinas de edificações, entre outros. E, para os pontos artificiais, são comuns os alvos em formato de letras (“L” ou “X”), cruz e círculos.

O método mais empregado na coleta de pontos de controle é o posicionamento rápido estático diferencial, GNSS pós-processado ou RTK. (JIANG et al., 2017) coletaram pontos GNSS RTK de cantos de piscinas em residências e cruzamentos de vias para o georreferenciamento de linhas de transmissão na China. Círculos de 25 cm de diâmetro foram utilizados para georreferenciar um estacionamento na Alemanha (NEITZEL; KLONOWSKI, 2011). Alguns trabalhos compararam a exatidão conseguida em MDTs gerados com SfM e pontos de controle levantados no campo com GNSS, com estação total (HARWIN; LUCIEER, 2012) e com laser scanner (JAUD et al., 2016).

Alves Júnior et al. (2015) georreferenciaram um ortomosaico da cidade histórica de Goiás, GO, gerado a partir de imagens coletadas através de RPAS Swinglet CAM, com 8 pontos de apoio e verificaram a qualidade deste com 30 pontos de verificação, ambos coletados por GNSS. Esses pontos foram distribuídos uniformemente numa área de 889 ha.

Análises sobre melhorias no ortomosaico e no MDT em função de número de pontos de apoio revelaram que a partir de 15 pontos, sendo pelo menos 1 a cada 6 hectares, não produz melhorias substanciais na exatidão posicional.

3.5.4 Modelagem Baseada na Imagem e Renderização

A aerofotogrametria a partir de imagens coletadas com RPAS fundamenta-se em conceitos da visão computacional de modelagem baseada na imagem (DEBEVEC; TAYLOR; MALIK, 1990; OLIVEIRA, 2002; NI; STEEDLY; DELLAERT, 2007; REMONDINO et al., 2011).

A técnica SfM (*Structure from Motion*) visa reconstruir uma superfície ou objeto a partir da correspondência de pontos comuns, colhidos de várias imagens de uma cena obtida com a câmera em movimento, em que cada ponto consiste de uma posição 3D e uma cor extraída de uma imagem (SNAVELY; SEITZ; SZELISKI, 2008; FONSTAD et al., 2013). Baseia-se em algoritmos que detectam e descrevem elementos e características locais de cada imagem, onde realiza correspondência de pontos bidimensionais em todas as imagens da mesma cena, condição para calibrar a câmera e calcular as posições dentro de um gride local e produzir uma nuvem esparsa de pontos (SZELISKI, 2010). Na Figura 8 é apresentado o fluxo de trabalho para o processamento digital de imagens pela técnica SfM.

Figura 8 - Processamento digital de imagens com conceitos de visão computacional pela técnica SfM

Fonte: (Corsi; Slapsak; Vermeulen, 2013).

Para SfM é indiferente se a coleta de imagens foi realizada com câmera métrica ou não métrica. O mais importante é garantir que a separação angular entre as imagens não supere 25 a 30 graus, obtido com uma sobreposição de 60% a 80% para imagens capturadas de um único local, e assegurar que cada objeto fotografado tenha uma textura única para o bom desempenho dos algoritmos de detecção e descrição dos elementos (MOREELS; PERONA, 2007; CORSI; SLAPŠAK; VERMEULEN, 2013).

As coordenadas fornecidas pelo GNSS da aeronave e a composição RGB do ponto de tomada da imagem no terreno, capturada pela câmera e atitude da aeronave durante a coleta de imagens descrita pela IMU com as rotações em torno dos eixos x, y e z (ω , ϕ e κ), compõem o *log* de voo, o qual será utilizado pelo SfM para cumprir as etapas até a geração da nuvem de pontos esparsa. Na Figura 9 são apresentadas algumas imagens e o *log* de voo utilizados no estudo de caso da parcela de cultura de cana de açúcar.

Figura 9 - Exemplo de imagens e log de voo da barragem da UHE Álvaro de Souza Lima, Bariri-SP

Id.	Lat (graus)	Long (graus)	Alt. (m)	Yaw (graus)	Pitch (graus)	Roll (graus)
IMG_6742.JPG	-22,15441651	-48,7545168	809,254	9,2	6,9	1,9
IMG_6743.JPG	-22,15376551	-48,7545800	810,881	8,6	6,6	0,0
IMG_6744.JPG	-22,1531106	-48,7546379	810,208	9,1	7,6	1,1
IMG_6745.JPG	-22,1524797	-48,7546825	810,883	10,6	9,4	2,0

Fonte: XMobots Aeroespacial e Defesa, 2015.

A detecção de elementos em SfM corresponde a identificação de pontos de interesse (PI ou *keypoints*) que possuem as seguintes características: textura inconfundível em relação a seus vizinhos, alta repetibilidade, invariância na iluminação, ruídos na imagem e transformações geométricas básicas como escala, translação, rotação e corte (SNAVELY; SEITZ; SZELISKI, 2008; SZELISKI, 2010). O algoritmo mais utilizado nesta etapa é o SIFT (Scale Invariant Feature Transform), que detecta uma região comum em várias fotografias (LOWE, 1999; BROWN; LOWE, 2002; MOREELS; PERONA, 2007).

Na descrição dos elementos em SfM, o algoritmo busca localizar os PIs 2D que representam o mesmo ponto físico 3D, em que cada conjunto de pontos codificados com a mesma cor corresponda a projeção do mesmo ponto 3D. O descritor de feições calcula um vetor do elemento com as características locais para descrever uma correção local de pixels em torno de cada PI. Assim como os PIs, esses vetores devem ser invariantes em escala (CORSI; SLAPŠAK; VERMEULEN, 2013).

Na etapa do descritor de correspondência, todos os vetores descritos na fase anterior são combinados em pares em diferentes imagens através da junção de elementos semelhantes, onde é calculada a distância entre os elementos, por exemplo, a distância euclidiana. A dimensão dos vetores tem impacto direto no tempo de processamento. Este processo é realizado em todos os pares de imagens, verificando se a suposição das localizações das correspondências cumpre a restrição da geometria Epipolar, ou seja, a geometria intrínseca em dois pontos de vistas. A geometria Epipolar independe da estrutura da cena e depende apenas dos parâmetros internos da câmera e da posição relativa (SZELISKI, 2010).

Na etapa de triangulação, a SfM calcula a localização dos pontos num sistema de referência local, criando uma nuvem esparsa de pontos 3D. A triangulação na imagem requer que sejam conhecidas as orientações interior e exterior da imagem, que é conseguida após a combinação de todas as orientações relativas, em pares, na forma de matriz fundamental. Uma matriz fundamental é a representação algébrica da geometria epipolar 3 x 3 que relaciona os pontos correspondentes em imagens estéreo (Figura 10).

Figura 10 - Triangulação 3D e geometria epipolar na identificação do ponto P em SfM

Fonte: Szeliski, 2010.

Assim, pelo teorema da reconstrução projetiva, um conjunto de pontos em duas vistas

é definido pela matriz fundamental. Então, a geometria da cena 3D e a matriz de projeção das imagens podem ser reconstruídas a partir da correspondência de quaisquer duas reconstruções projetivamente equivalentes (SZELISKI, 2010).

Os vetores $t = c_1 - c_0$, $p - c_0$ e $p - c_1$ são coplanares e definem as restrições básicas epipolar expressas em termos de medida de pixel x_0 e x_1 . A matriz fundamental é apresentada na Eq. 3.

$$\widehat{x}_1^T E \widehat{x}_0 = 0, \text{ onde } E = [t] \times R \quad (3)$$

Após triangulação, os pares de imagem orientados na matriz fundamental são combinados para formar o bloco completo de imagens e gerar a estrutura da cena. Dessa forma, tem-se um modelo sub-otimizado porque nem todas as imagens foram sobrepostas e há discrepâncias na estrutura devido a alguns erros algébricos ocorridos na fase de medição. Para superar esse problema, a maioria dos algoritmos SfM realiza o ajustamento de blocos, *Bundle Block Adjustment* (TRIGGS et al., 2000; NI; STEEDLY; DELLAERT, 2007; JEONG et al., 2012), o qual otimiza iterativamente a estrutura 3D e as matrizes de projeção de todas as imagens, simultaneamente, executando uma minimização não linear da medida real. Isto significa dizer que, numa abordagem SfM, a estrutura da cena e as matrizes da câmera são recuperadas sem o conhecimento da posição da câmera ou orientação interior (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003; SZELISKI, 2010).

A cena reconstruída após uma abordagem SfM padrão encontra-se num sistema de coordenadas local. Com a introdução de pelo menos 3 pontos de controle em um sistema de referência global pode-se obter uma cena equivalente à cena do mundo real. O modelo completo em um sistema de referência absoluto é conseguido com uma transformação de semelhança de Helmert de 7 parâmetros (três translações, uma escala e três rotações), como descrito por (GARCÍA, 2002) e apresentado na Equação 4 a seguir:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} + H \cdot R \omega \phi \kappa \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (4)$$

Em que:

X, Y e Z = coordenadas dos pontos em um sistema referência;

x, y e z = coordenadas dos pontos em outro sistema de referência;

Tx, Ty e Tz = translações entre ambos os sistemas de referência;

H = fator de escala entre ambos os sistemas;

R ω ϕ κ = rotação nos eixos x, y e z (matriz 3 x 3), cujos coeficientes da matriz de rotação são:

$$r_{11} = \cos \kappa \cdot \cos \phi;$$

$$r_{12} = \sin \phi \cdot \sin \omega \cdot \cos \kappa - \sin \kappa \cdot \cos \omega;$$

$$r_{13} = \sin \phi \cdot \cos \omega \cdot \cos \kappa - \sin \omega \cdot \sin \kappa;$$

$$r_{21} = \sin \kappa \cdot \cos \phi;$$

$$r_{22} = \sin \kappa \cdot \sin \omega \cdot \sin \phi + \cos \kappa \cdot \cos \omega;$$

$$r_{23} = \sin \phi \cdot \cos \omega \cdot \sin \kappa - \sin \omega \cdot \cos \kappa;$$

$$r_{31} = -\sin \phi;$$

$$r_{32} = \cos \phi \cdot \sin \omega;$$

$$r_{33} = \cos \phi \cdot \cos \omega.$$

Dispondo-se de mais pontos, pode-se aplicar o ajustamento de mínimos quadrados utilizando-se sistemas de equações indiretas. Uma vez determinado esses parâmetros, o problema se reduz a aplicar as equações:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Tx \\ Ty \\ Tz \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H & a & b \\ -a & H & c \\ -b & -c & H \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Sendo:

$$a = -H \cdot \sin(\kappa);$$

$$b = H \cdot \sin(\phi);$$

$$c = -H \cdot \sin(\omega).$$

Reorganizando a matriz para se obter os 7 parâmetros de transformação, tem-se:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Rx \\ Ry \\ Rz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x & y & z & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y & -x & 0 & z \\ 0 & 0 & 1 & z & 0 & -x & -y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Tx \\ Ty \\ Tz \\ a \\ b \\ c \end{pmatrix}$$

$$K(3 \times 1) + R(3 \times 1) = A(3 \times 7) \cdot X(7 \times 1)$$

Aplicando a solução por mínimos quadrados ao sistema de equações indiretas, tem-se:

$$x = (A^T p A)^{-1} A^T p K$$

sendo p a matriz diagonal dos pesos das observações.

A matriz dos resíduos é igual a

$$r = Ax - K$$

o estimador a posteriori da observação típica de peso unitário é igual a:

$$\sigma_o = \sqrt{\frac{\sum p r^2}{R}}$$

E o estimador da matriz variância e covariância das incógnitas:

$$\sigma^2_{xx} = \sigma_o^2 (A^T p A)^{-1}$$

A linearização acima é uma simplificação do sistema inicial. Sendo assim, deve-se fazer algumas considerações antes de utilizá-lo:

- se as rotações ω e ϕ são menores que 1 grau, os parâmetros obtidos serão corretos para aplicar a transformação entre ambos os sistemas;
- se as rotações ω e ϕ são inferiores a 30 graus, os parâmetros de transformação serão aproximados e será necessário resolver o sistema de equações indiretas de maneira iterativa;
- se as rotações ω e ϕ são superiores a 100 graus, o processo iterativo não converge e será necessário trocar os eixos no sistema de coordenadas para resolver o sistema de equações.

Após o georreferenciamento do bloco, constrói-se um modelo 3D texturizado. A etapa essencial desse processo é a construção da nuvem de pontos densa. A nuvem de pontos densa é gerada a partir do algoritmo MVS (*Multi-Vista Stereo*), que calcula a geometria pixel a pixel, reproduzindo alto nível de detalhes da cena (OLIVEIRA, 2002; SNAVELY; SEITZ; SZELISKI, 2008).

O Modelo 3D georreferenciado é um MDS, ou seja, um modelo topográfico com todas as estruturas impostas como vegetação e construções. O MDS combinado com as posições da câmera e os parâmetros de orientação interior permite a geração de ortofotos verdadeiras, em que todos os objetos com certa altura são posicionados com precisão (VERHOEVEN et al., 2013). Os passos descritos acima são ilustrados na Figura 11.

Figura 11 - Representação de um modelo 3D georreferenciado (MDS). (A1) Imagens oblíquas usadas na reconstrução da cena 3D. (A2) Área de máscara. (A3) Pontos de interesse. (B) Nuvem esparsa de pontos e posição das câmeras. (C) Mapa de profundidades. (D) Modelo 3D. (E) Ortomosaico.

Fonte: Veroheven et al., 2013.

3.5.5 Exatidão de Produtos Cartográficos da Fotogrametria com Sensores Embarcados em RPAS

A exatidão de um MDE do Rio *des Remparts*, localizado numa ilha do Oceano Índico, a partir de 9 pontos de checagem foi comparado com um levantamento laser scanner terrestre de uma pequena região mapeada. Da análise dos pontos de checagem, obtiveram o RMSE horizontal do MDE processado no PhotoScan de 4,5 cm. O RMSE vertical foi de 12,4 cm. O laser scanner terrestre permitiu observar a direção dos escorregamentos dos pontos no MDE (JAUD et al., 2016).

Xiao et al. (2016) avaliaram a exatidão de um MDE a partir de 3 aspectos: inspeção visual, descrição quantitativa e complexidade. Na inspeção visual, verificaram se a forma da nuvem densa de pontos 3D era consistente com a feição do terreno correspondente. Na descrição quantitativa, a nuvem densa de pontos 3D foi comparada com uma nuvem de pontos densa coletadas com laser scanner e pontos de controle medidos no campo. Os requerimentos dos dispositivos e custos de tempo na computação foram avaliados quanto ao aspecto e a complexidade.

A viabilidade de uso de ortomosaico, gerado a partir de imagens de alta resolução coletadas com câmera não métrica embarcada em um RPAS de asa fixa para monitoramento de área de pastagem em Idaho (EUA), foi verificada por (LALIBERTE et al., 2010). Para a avaliação da exatidão geométrica do ortomosaico, utilizaram como fonte mais precisa as imagens coletadas com uma câmera digital para mapeamento, UltraCam, em um voo convencional de resolução de 15 cm, cuja exatidão horizontal era de 0,8 m. Do ortomosaico de controle foram extraídos 800 pontos de forma randômica que comparados com o ortomosaico RPAS resultou numa exatidão horizontal variando de 1,5 m a 2,0 m.

Harwin e Lucieer (2012) avaliaram a exatidão geométrica de uma nuvem densa de pontos de uma seção de 100 m numa área estuarina, na Tasmânia (Austrália), com base em 90 pontos de checagem. Os pontos de controle foram coletados com estação total e posicionamento diferencial GNSS RTK. Avaliaram 2 cenários: pontos de apoio e checagem coletados com estação total; pontos de apoio GNSS RTK e pontos de checagem com estação total. Nestes dois cenários, avaliaram a identificação automática e semi automática dos pontos na nuvem de pontos e determinaram os parâmetros da transformação de Helmert e o RMSE em coordenadas E, N, EN e H. Os resultados mostraram que, para

um voo a partir de 50 m, pode-se obter nuvem de pontos acurada de 25 – 40 mm.

Os mesmos autores também avaliaram o layout dos pontos de controle e concluíram que a precisão de georreferenciamento é fortemente influenciada pela distribuição destes pontos e, em menor grau, pela correspondência do seu centro de agrupamento. Com base nessa avaliação, a melhor distribuição de pontos de controle é a composição uniforme por toda a área de foco, com um espaçamento de um quinto a um décimo da altura de voo do UAV. A variação do terreno é importante e os PCs devem estar mais próximos uns dos outros em terrenos mais íngremes. Os alvos devem ser claramente visíveis à altura de voo escolhida, à resolução da câmara e à distância focal (> 10 cm de diâmetro para uma altura de voo de 40-50 m com a Canon 550D). Devem, ainda, ser visivelmente diferentes, em cor, da paisagem circundante.

Neitzel e Klonowski (2011) avaliaram a exatidão posicional de uma nuvem de pontos de um estacionamento na Alemanha, gerada a partir de imagens coletadas com quadricóptero de um voo a 50 metros do solo. Foram adotados seis pontos de apoio e os cantos dos limites das vagas como pontos de checagem. Esses pontos foram levantados por taqueometria. O desvio padrão da nuvem de pontos processada no software PhotoScan foi de 0,256 m para EN.

Turner et al. (2012) avaliaram a exatidão horizontal de dois mosaicos na Antártica, sendo Robinson's Ridge 0,5 ha e Red Shed de 1,1 ha. Para o primeiro, foram adotados 25 pontos de apoio e 43 pontos de checagem e, para o segundo, 20 pontos de controle e 63 pontos de checagem. Esses pontos consistiram em alvos de 12 cm de diâmetro, na cor laranja, e suas coordenadas verdadeiras foram determinadas por meio de GPS de dupla frequência (precisão de 2 cm na horizontal e 4 cm na vertical). A exatidão horizontal foi medida por meio dos erros absolutos em coordenadas E, N, EN e desvios padrão que variaram entre 10 e 15 cm.

Mancini et al., (2013) fizeram uma avaliação quantitativa das diferenças verticais absolutas entre os MDEs, por RPAS-SfM com 10 pontos de apoio e laser scanner, obtidas pela comparação de superfícies e 126 pontos de checagem GNSS-RTK, distribuídos ao longo de transectos sobre uma área de dunas com 25.200 m² localizada em Ravenna na Itália. Os resultados mostraram que a média da distância entre MDE – RPAS foi inferior a 3 cm, na horizontal, em 99% da amostra. Já nas elevações foi de 6 cm e o RMSE horizontal foi de 11

cm. Quando comparado com MDE laser scanner, a média da distância foi de 1,5 cm e o RMSE foi de 22 cm.

Benassi et al. (2017) comentam que a maior parte dos custos do levantamento com RPAS é atribuída aos levantamentos dos pontos de controle no campo, usados para corrigir deformações devido ao uso de câmeras de pequeno formato, baixa altitude de voo e, subsequente, pequeno GSD e falhas de sobreposição. Os autores realizaram um voo com eBee – RTK (sensifly) numa área de 500 m x 400 m, na Universidade de Parma, Itália, onde foram locados 12 pontos de apoio e 14 pontos de checagem. Foi verificada a exatidão nos pontos de checagem identificados no GNSS–AT (embarcado) com a exatidão do bloco orientado com os pontos de controle levantados com GNSS RTK. O RMSE horizontal médio foi de 2,2 cm para GNSS-AT e 1,5 cm para a orientação com pontos de apoio. O RMSE da elevação foi de 5,5 cm e 2,1 cm, respectivamente.

A exatidão na ortoimagem e MDE para modelagem de risco a inundação, com um ponto de apoio levantado com GNSS diferencial para cada 2 hectares, foi conseguido um RMSE XY na ortoimagem de 0,076 m e RMSE na elevação de 0,080 m. No entanto, no georreferenciamento direto, o RMSE XY foi de 3,27 metros e o RMSE na elevação de 2,20 metros, sendo impraticável para o fim da modelagem (COVENEY; ROBERTS, 2017).

A influência da altitude de voo de um quadricóptero, resolução e exatidão de ortomosaicos em duas áreas de cultura de trigo em Sevilha, na Espanha, foram testadas por (GÓMEZ-CANDÓN; CASTRO; LÓPEZ-GRANADOS, 2014). Foram implantados 53 alvos quadrados, na cor branca e com cruz laranja, no centro como pontos de controle, os quais foram levantados com DGPS (precisão de 2 cm em X, Y). Destes, 45 pontos foram usados como pontos de apoio e 7 como checagem. Três voos foram executados a 30, 60 e 100 m e o RMSE XY encontrados foram de 0,15 cm $\pm$ 0,12; 0,26 cm $\pm$ 0,12 e 0,25 cm $\pm$ 0,13, respectivamente. Os autores recomendam usar o número de pontos de controle, pelo menos, igual ao número de sobreposições.

A exatidão de MDE de uma cultura de olivas em Calancha, na Espanha, foi avaliada em relação a alturas de voo de um quadricóptero, 50 e 100 m, e diferentes níveis de sobreposição. Erros superiores a 10% na elevação de 30 árvores foram detectados para sobreposição menores que 70% no voo a 50 m. Para o voo a 100 m, o erro foi inferior a 10% em todas combinações de sobreposição (Figura 12) (TORRES-SÁNCHEZ; LÓPEZ-GRANADOS; PEÑA, 2015) .

Figura 12 - Erro médio (%) da elevação afetado pela sobreposição e alturas de voo (50 e 100 m). As barras indicam a dimensão do valor do erro. Números entre parênteses indicam o número de árvores detectadas de um total de 30 usadas na validação

Fonte: Torres-Sanchez et al., 2017.

Silva et al. (2016) realizaram a avaliação da exatidão do cálculo de volume de uma pilha de rejeito mineral, comparando MDTs gerados no ArcGis a partir da nuvem de pontos coletadas com GNSS diferencial L1L2, RPAS e laser scanner terrestre. Para o georreferenciamento da nuvem de pontos RPAS foram adotados 10 pontos de apoio e 10 pontos para checagem pintados no solo (50 x 50 cm) e levantados por meio de GNSS rápido estático. Foram calculadas as diferenças altimétricas dos pontos dos MDTs e do controle e realizados testes de tendências para detectar sistematismos e aleatoriedade. A verificação da exatidão do volume foi por meio de comparação entre um MDT primitivo (sem a pilha de rejeito) e MDT com a pilha de rejeito. Concluíram que o MDT_{rpas} foi o mais acurado que os demais quando comparado com o PEC-PCD. A exatidão na elevação foi de 0,30 m.

Esses autores também realizaram uma análise comparativa de custos financeiros, operacionais e de segurança das três tecnologias, onde o uso do RPAS foi o que apresentou menor custo (Tabela 4).

Uma avaliação da exatidão horizontal e vertical de produtos fotogramétricos em função da altitude de voo de um tricóptero (RPAS com rotores dispostos em formato de Y) sobre um pequeno curso d'água (200 m x 10 m) foi realizada na Universidade de Kelantan, na Malásia (UDIN; AHMAD, 2014). Os pontos de controle foram pintados no solo, na forma de uma cruz branca, e as posições foram obtidas por estação total, sendo 23 pontos de apoio e 10 pontos de checagem. A exatidão foi avaliada por meio do RMSE do ortomosaico e do MDT de dados coletados a 40, 60, 80 e 100 m de altura do solo. Os RMSE_x, RMSE_y e RMSE_z

médios foram de 0,413 m, 0,156 m e 0,250 m, respectivamente. A variação da altitude pouco influenciou nos resultados.

Tabela 4 - Comparação entre modelagens com dados coletados com RPAS, GNSS diferencial e laser scanner

Atributo	RPAS	GNSS diferencial	Laser Scanner terrestre
Tempo de coleta de dados ¹	10 min	8 horas	12 horas
Densidade de pontos / m ²	154	0,36	971
Tempo de processamento	8 horas	1 hora	48 horas
Nº de pessoas envolvidas	2	1	3
Custo do equipamento	R\$ 55.000,00	R\$ 75.000,00	R\$ 800.000,00
Segurança	alta	baixa	moderada
Exatidão da elevação ²	0,30 m	1,0 m	1,3 m

¹Não está incluído o tempo de levantamento de coleta de dados dos pontos de controle.

²Exatidão da elevação verificada com 10 pontos de checagem.

Fonte: Silva et al., 2016.

Um estudo sobre exatidão do mapeamento com RPAS foi conduzido no campus da Universidade de Chang Jung, em Taiwan. Três pontos de controle e quatorze pontos de checagem foram coletados por meio de levantamento topográfico com estação total com precisão de 1:2000. O erro foi medido em termos da porcentagem entre os pontos de checagem no ortomosaico e do levantamento de campo, sendo inferiores a 0,008% em X e 0,020% em Y. Estes autores consideram que a fotogrametria por meio de RPAS pode substituir os levantamentos por GNSS e topográfico com estação total, até a escala 1:2000 (CHI; YA-FEN; SHANG-EN, 2016).

A exatidão de ortomosaico e MDT gerados com imagens coletadas câmera Sony ILCE 6000 embarcada em hexacóptero processados pela técnica SfM para estudo de perda de solo numa parcela de cana de açúcar na cidade de Jaboticabal, SP apresentou desvios padrão nas coordenadas de 0,250 m em E e de 0,457 m em N, e na elevação foi menor que 0,460 m. As diferenças observadas no comprimento de rampa e declividade do MDT da fotogrametria RPAS quando comparadas com um MDT gerado com pontos GNSS da mesma parcela, foram menores que 3% (VITTI et al., 2017).

A influência no número de pontos de apoio e densidade na exatidão do modelo digital

de superfície (MDS) é relatada por Gindraux et al. (2017). Estes autores avaliaram 3 MDS nos Alpes Suíços em diferentes estações do ano, com até 101 pontos de controle. Concluíram que a exatidão é mais afetada pela distância entre esses pontos e pela densidade. Coveney e Roberts (2017) relatam que acréscimos a partir de 15 pontos não produzem melhorias significativas na exatidão horizontal e vertical.

4. QUALIDADE DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS

A aerofotogrametria pode ser dividida em dois momentos, de acordo com as características dos sensores utilizados nos aerolevantamentos. Até a década de 80, predominou o uso de câmeras métricas analógicas, com distância focal de 35 mm e fotografias de 23 cm x 23 cm, cujos produtos cartográficos gerados a partir de restituidores analógicos eram em escalas de até 1:25.000. Em seguida, com o auxílio de scanners, essas fotografias eram convertidas para o formato digital (*softcopy*), armazenadas em um *harddisk* e os mapas eram gerados a partir de softwares analíticos. Atualmente, popularizou-se o uso de imagens digitais coletadas por sensores de alta resolução em levantamentos aéreos e orbitais e novas técnicas de processamento permitem avaliar os produtos cartográficos em diferentes fases do processo de produção (JENSEN, 2011).

Hernandez-Lopez et al. (2012) relatam que o processo de controle de qualidade na produção de ortofotos, a partir de imagens digitais, varia em cada uma das fases: voo fotogramétrico, controle e checagem dos pontos, aerotriangulação, modelo digital do terreno e ortofoto. A base de dados deve integrar informações geoespaciais e alfanuméricas inter-relacionadas em cada fase. As técnicas de controle de qualidade devem garantir, além da exatidão geométrica e a qualidade das informações temáticas da ortofoto final, também o controle dos produtos das fases intermediárias, de modo que os produtos derivados de cada fase possam ter novas aplicações.

Devido ao tamanho dos dados de entrada, a automação do controle de qualidade é crucial e deve-se considerar duas premissas fundamentais da fotogrametria. A primeira refere-se aos parâmetros de controle geométrico, que envolvem o georreferenciamento em diferentes formatos e sistemas de referência, o controle do desvio vertical na imagem, paralaxe e o controle de escala, que é rigorosamente analisado no modelo digital de elevação. A segunda trata dos parâmetros de controle temático, em que o método vicário é utilizado para validação

dos parâmetros radiométricos obtidos (HERNANDEZ et al, 2012).

Na Tabela 5 são apresentadas as seis componentes de qualidade de produtos cartográficos ou geográficos (ROCHA, 2002; ARIZA LÓPEZ; ATKINSON GORDO, 2008).

Tabela 5 - Componentes para avaliação da qualidade de uma base de dados geográficos

Componente	Descrição
Exatidão Posicional	Proximidade entre as coordenadas representadas e as verdadeiras, com base num sistema de referência.
Exatidão do atributo	Atributos podem ser categóricos ou numéricos. E sua exatidão é influenciada pelo tempo.
Exatidão temporal (Linhagem)	Refere-se à atualidade do dado relativa à adequação do intervalo de tempo entre a geração da BDG e a análise em si. Alguns dados, como de meio ambiente e evolução de estruturas, variam muito no tempo.
Consistência lógica	Está relacionado ao cumprimento de regras topológicas na construção dos atributos. Por exemplo, uma linha começa e termina em um nó, ou um cruzamento é definido por um nó.
Compleitude	Mede o quão completa é o produto cartográfico. As informações presentes no mapa dependem da seleção de temas e de regras de generalização. A legenda deverá ser completa e sem elementos estranhos para facilitar sua captura.
Genealogia	Refere-se às fontes que deram origem ao produto cartográfico, como processos de coleta, métodos de análises, sistema de referência, parâmetros de transformação dos dados da projeção entre outros.

Rocha (2002) avaliou a qualidade geométrica do mapeamento cadastral dos municípios de Florianópolis (SC), Porto Alegre e Gravataí (RS) por meio dos seguintes atributos: atendimento às necessidades dos usuários, exatidão posicional e parâmetros de qualidade posicional. Neste último, foram analisadas a escala e articulação das folhas em cartas analógicas e digitais.

Celestino e Rocha (2011) avaliaram a exatidão posicional de imagens fusionadas e ortoretificadas do sensor *Quickbird*, com resolução de 0,70 m, do condomínio Ilhas Park, no Rio Grande do Sul, com base no PEC para produtos analógicos (BRASIL, 1984). Pereira e Nero (2012) realizaram estudo semelhante de uma ortoimagem do Campus da Universidade de São Paulo e compararam com a Especificação Técnica para Aquisição de Dados Vetoriais ET-ADGV (2011), para produtos digitais. Ambos concluíram que este produto atende a escala 1:5000, classe B.

A qualidade da base cartográfica da cidade de São Carlos na escala 1:2000, obtida a partir de um vôo fotogramétrico na escala 1:8000 do ano de 1998, foi avaliada quanto a qualidade posicional e linhagem, completude, fidelidade semântica e consistência lógica. Em

relação a qualidade posicional, testes estatísticos paramétricos foram aplicados e resultou no enquadramento de B do padrão brasileiro (SANTOS; SEGANTINE; SILVA, 2007).

A qualidade dos dados geográficos também pode ser estabelecida em sua resolução, a qual pode ter muitas dimensões (VEREGIN; HUNTER, 2000), vide Tabela 6.

Tabela 6 - Componentes para avaliação da qualidade de uma base de dados geográficos com base no parâmetro resolução

Componente	Descrição
Resolução Espacial	Definida como o tamanho do menor elemento que pode ser distinguido ou separado de suas partes constituintes ou de um conjunto a que pertença. Para dados vetoriais é a menor dimensão cartografável, enquanto que para dados raster, é o tamanho do pixel.
Resolução Temática	Distinguem-se dados quantitativos e qualitativos. Os primeiros possuem a mesma definição de resolução espacial. Quanto aos dados qualitativos, referem-se a sua adequação/precisão na definição de uma classe.
Resolução Temporal	Refere-se ao intervalo de tempo de amostragem que deverá ser sempre inferior a duração do fenômeno a ser representado

Fonte: Verigin; Hunter, 2000.

Quanto às formas de análise, os mesmos autores, relatam que podem ser feitas através das seguintes maneiras:

Estimação de um especialista: são orientativas e subjetivas, pois dependem de quem a realiza. As conclusões são qualitativas, classificando-se em boa, regular ou má;

Estudo da coerência interna: tem por objetivo a busca de incoerências no trabalho, como por exemplo, verificação de incongruências entre os valores dos atributos temáticos nas relações possíveis entre os objetos;

Comparação com as fontes: a informação é comparada com os dados que lhe deram origem, por exemplo, quando uma informação é originada a partir da digitalização de um mapa, pode se detectar discrepâncias (como elementos que faltam, elementos duplos, erro na forma ou dimensão, nos atributos, entre outros);

Comparação com fontes de maior exatidão: consiste em adotar como referência uma fonte mais exata ou a coleta de dados no campo e realizar uma análise estatística desses dados com dados da BDG. Por se tratar de um método mais caro, utilizam-se amostras que sejam suficientes de modo que haja uma baixa probabilidade de se aceitar uma BDG ruim e uma baixa probabilidade de se rejeitar uma boa BDG. Quando se utiliza uma fonte cartográfica

mais exata, é importante conhecer a exatidão dessa fonte e garantir que tanto a fonte como a base cartográfica em análise tenham sido compiladas e classificadas por processos semelhantes e que tenham, ainda, as mesmas unidades mínimas cartografáveis;

Avaliação do tipo dedutivo: consiste em modelar as funções de propagação de erros para determinar a exatidão do produto final. São obtidos por funções de transformação na produção cartográfica e baseiam-se apenas na exatidão da fonte original.

A gestão da qualidade dos dados geoespaciais é importante para o uso interdisciplinar dos mesmos, por exemplo, dados de recursos naturais e tempo georreferenciados podem ter usos em vários interesses, tais como, planejamento regional, pesquisa, economia, entre outros. Esses dados passam por cinco fases: coleta, análise de consistência, armazenamento, compartilhamento e uso. Para dados espaciais, a qualidade consiste principalmente na quantidade abundante, consistência lógica, posição, propriedade e temporalidade acuradas e descrição dos dados. Devem reunir os aspectos mostrados na Tabela 7 (SUN; WONG, 2010).

Tabela 7 - Principais aspectos relacionados a qualidade de dados geoespaciais

Aspectos	Descrição
Formato em função das características dos dados	Armazenamento, vetor, grade, descrição das propriedades.
Abundância de dados	Trata-se da quantidade de dados que cobrem um evento num período, por exemplo, dados de tempo e hidrológicos.
Veracidade dos dados	Refere-se à fidelidade do dado ao ser convertido em dado científico (posição acurada, informação temporal e descrição)

Fonte: Sun; Wong, 2010.

Muitos estudos foram conduzidos sobre a teoria dos erros de dados espaciais. Envolviam sistema de análise, fontes, discriminação e métodos de medidas, gestão do erro e alguns métodos para minimizar o erro como forma de melhorar a qualidade dos dados. No entanto, há poucos estudos sobre o estudo da incerteza e o controle da qualidade de dados. Além de atender aos requisitos básicos de qualidade técnica (projeção, escala, *datum*, formato e detalhes), atualmente, a cartografia digital deve considerar a satisfação do usuário para melhorar a performance dos produtos (WU et al., 2010).

4.1 Aspectos Estatísticos da Exatidão Posicional

A exatidão posicional é entendida como a qualidade quantitativa dos dados posicionais e de grande interesse para interoperabilidade de produtos cartográficos (ISO, 2002). A interoperabilidade é a capacidade de comunicação entre bases de dados geográficos nos processos de adição, fusão e atualização de dados. O sistema global de navegação por satélite tem a capacidade de apoiar grandes estruturas de conjuntos de dados, com grande exatidão posicional. Além disso, é possível avaliar o comportamento de um conjunto de dados geográficos e detectar distorções que impossibilitam a interoperabilidade (GALO; CAMARGO, 2002; ARIZA LÓPEZ; ATKINSON GORDO, 2008). No entanto, a maioria das agências nacionais de mapeamentos não oferece garantia de qualidade (JAKOBSSON; VAUGLIN, 2001).

O nível de exatidão posicional de um objeto geográfico ou espacial depende diretamente da exatidão posicional de um produto cartográfico. Assim, o processo de aquisição de dados deve gerar uma geometria com exatidão posicional igual, ou superior, à do produto cartográfico final. A exatidão na aquisição é igual a do produto cartográfico digital final, pois após a aquisição vetorial de um elemento qualquer, sua geometria não é mais alterada nos processos posteriores (CONCAR, 2011).

Em um conjunto de dados geográficos, a posição de uma feição no mundo real é dada por suas coordenadas geográficas em um sistema de referência apropriado. A exatidão posicional representa a proximidade da posição da feição em relação a sua posição verdadeira naquele sistema. Métodos estatísticos são utilizados para avaliar erros sistemáticos e randômicos. Estes métodos são especificados por meio do erro médio quadrático (RMSE), pela média dos valores dos erros (μ) ou, ainda, pelo desvio padrão (s). A avaliação da exatidão posicional é realizada através da comparação com uma fonte independente de maior exatidão (ARIZA LÓPEZ; ATKINSON GORDO, 2008).

Os métodos de avaliação da exatidão posicional devem levar em conta a otimização econômica da qualidade dos dados geográficos (ISO, 2003). Isso assegura que o produtor de dados geográficos entregará o produto de acordo com a norma, com certo nível de confiabilidade e segurança e a um custo aceitável (KREK; FRANK, 2000). Porém, as normas de padronização da exatidão não compartilham os mesmos métodos e formulações estatísticas

de avaliação. Assim, um mesmo produto cartográfico pode ter avaliações diferentes de acordo com a norma aplicada. Alguns aspectos são comuns: hipótese básica, precisão dos levantamentos de amostragem, estimativa da incerteza, tratamento de erros sistemáticos e valores atípicos, e por último, a informação dada no método em si (ARIZA LÓPEZ, 2000; CELESTINO; ROCHA, 2011; PEREIRA; NERO, 2012).

As metodologias para avaliação da exatidão posicional devem considerar a avaliação planimétrica e altimétrica por caminhos independentes, uma vez que os comportamentos dessas duas grandezas atuam de formas diferentes. Uma vez que um produto cartográfico pode ser planimétrico ou altimétrico, ou ambos, isto implica em duas hipóteses básicas que condicionarão as análises estatísticas: erro linear, se as coordenadas são analisadas separadas ou erro circular ou global, se são analisadas juntas. A altimétrica é claramente linear. Alguns padrões consideram a altimetria independente da planimetria, outros usam a planimetria para ajustar a altimetria (ARIZA LÓPEZ; ATKINSON GORDO, 2008).

A exatidão de dados posicionais para dados planimétricos, altimétricos e ortoimagens pode ser verificada, de forma independente, por meio do RMSE, pelo desvio padrão ou erro padrão, ou ainda, pela variância. O RMSE é a medida estatística mais usada na avaliação da exatidão e tem a vantagem da não pressuposição da normalidade da amostra.

A avaliação de modelos de elevação do terreno nem sempre são tratados pelos padrões de exatidão posicional. Especial interesse nesse assunto foi dado por (USGS, 1997; FEMA, 2003; NDEP, 2004). Uma metodologia para avaliar MDT foi proposta por (SANTOS, 2015).

4.2 Pontos de Controle

Os testes de exatidão horizontal e vertical são realizados por comparação de um conjunto de pontos bem definidos no produto cartográfico e seus homólogos, extraídos por meio de técnica de maior exatidão num sistema de referência planimétrico regional ou local, semelhante ao do produto verificado (FGDC, 1998).

A maioria dos padrões de avaliação da exatidão geométrica de um banco de dados geográficos (BDG) possui como elemento padrão o ponto, devido à simplicidade de aplicação, a facilidade de identificação no terreno ou mapa de referência e a flexibilidade de se aplicar nos vetores X, Y, Z, de forma independente ou conjunta. Além disso, os diferentes critérios de interpolação afetam a estimativa da exatidão posicional. Assim, há um certo grau

de discordância entre pontos bem definidos no campo e elementos facilmente identificáveis na imagem. Elementos como cantos e cruzamentos, que são largamente utilizados como pontos de controle, têm exatidão significativa para elementos semelhantes. A tipologia do ponto de controle é um parâmetro importante a ser definido pelo produtor e com o interesse do usuário do BDG (FGDC, 1998; ARIZA LÓPEZ, 2000; ROCHA, 2002; PEREIRA; NERO, 2012).

Os pontos de checagem geralmente são coletados por método análogo aos pontos de controle para georreferenciamento do modelo ou extraídos de uma base cartográfica de maior precisão. Para o teste de exatidão vertical, os pontos amostrados na superfície representada podem ser interpolados a partir de um conjunto de dados de mesmas coordenadas E/N (NDEP, 2004; ASPR, 2014; SANTOS, 2016).

As amostras de checagem devem ser independentes de todos os elementos utilizados em aerotriangulação e ajustamentos de blocos. Outros aspectos que têm forte influência na avaliação da exatidão posicional são os processos de generalização e simbolização, que podem deslocar os pontos do terreno (ATKINSON GORDO, 2005).

A maioria dos padrões de exatidão posicional não especifica o método empregado na definição do tamanho da amostra dos pontos de checagem e apenas trazem um número mínimo de pontos independente do tamanho da área coberta. Na maioria deles, 20 pontos são recomendados (ARIZA LÓPEZ; ATKINSON GORDO, 2008). No entanto, ASPRS (2014) recomenda adotar número de pontos em função do tamanho da área mapeada e se esta contém cobertura de vegetação ou não, partindo de 20 pontos. Para se obter 90% de nível de confiança na escala do mapa (1,64 vezes o desvio padrão das discrepâncias) seriam necessários no mínimo 24 pontos (NOGUEIRA JÚNIOR; MONICO; TACHIBANA, 2004).

Quanto à avaliação de modelos digitais de elevação, a recomendação é que os pontos sejam selecionados em regiões de terreno planas, uniformemente inclinadas e menores que 20% (NDEP, 2004). Em Fema, (2003), os pontos de controle devem manter certa distância dos elementos estruturantes do terreno e zonas, onde são tomados devem ter um tamanho em função do passo da malha.

4.2.1 Amostragem de Pontos de Checagem

O propósito da amostra é fornecer informações que descrevam os parâmetros do

universo da maneira mais adequada possível. Uma boa amostra deve permitir a generalização de seus resultados dentro de limites aceitáveis de dúvidas e os custos de planejamento e execução devem ser minimizados. O plano de amostragem inicia por determinar a extensão da área a ser amostrada, seguida da identificação das populações alvo e inquirida, do método de seleção da amostra e da dimensão da amostra (BOLFARINE; BUSSAB, 2004).

A amostragem de dados posicionais em produtos cartográficos é realizada sobre feições que são identificadas na imagem e cujas posições são conhecidas no terreno. O teste mais utilizado para avaliação da exatidão posicional é a comparação com dados de uma fonte mais precisa, geralmente, por levantamentos de campo ou de um mapa de escala maior (ANSI, 1998).

A precisão requerida para os elementos de controle, de acordo com o teorema de amostragem de Nyquist–Shannon, deve ter no mínimo o dobro da precisão do elemento controlado. Mas algumas propostas recomendam até 5 vezes, como é o caso da STANAG 2215. Na maioria dos casos, a recomendação é de 3 vezes, como sugerido por Merchant (1982).

Os elementos de controle mais usados são pontos discretos, homólogos no produto em análise e na fonte de controle. Dependendo da escala, quinas de quadras, tampões de poços de visita, caixas de passagem e cruzamento de vias são utilizados. No entanto, feições lineares representadas por segmentos têm a vantagem de apresentar a continuidade posicional dos elementos, muito útil na verificação da exatidão de MDT (ARISA; ATKINSON, 2002; SANTOS et al., 2015; SANTOS, 2016).

A amostragem de pontos de controle em campo é cara e o número de pontos deve considerar os riscos na tomada de decisão de aceitar ou rejeitar um mapa. Rocha (2002) recomenda que o custo da verificação por meio de pontos de controle deve ser inferior a 5% do custo do mapeamento. Geralmente, é comum se assumir uma hipótese para o comportamento do erro posicional. A partir dessa hipótese, deriva-se o tamanho da amostra (n) como uma função do tamanho da população (N), da variância (σ^2), do nível de significância (α) e do teste estatístico a ser aplicado (NOGUEIRA JÚNIOR; MONICO; TACHIBANA, 2004).

De acordo com o Teorema do Limite Central, a medida que aumenta o tamanho da amostra, as distribuições de $\bar{y}$ e do estimador T vão se aproximando de uma distribuição normal, tanto para o caso de amostragem aleatória simples com reposição (Eq. 5), como sem

reposição (Eq. 6) (BOLFARINE; BUSSAB, 2004). Assim, o tamanho de n deve ser tal que:

$$\frac{\bar{y} - \mu}{\sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}} \sim N(0, 1) \quad (5)$$

$$\frac{T - \tau}{N \cdot \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}} \sim N(0, 1) \quad (6)$$

Onde $N(0,1)$ denota uma variável aleatória com distribuição normal com média zero e variância 1. Os resultados das Eqs. 5 e 6, fornecem os intervalos de confiança aproximados para $\bar{y}$ e T . Com relação a média populacional, tem-se para n suficientemente grande, a Eq. 7

$$P \left(\frac{|\bar{y} - \mu|}{\sqrt{\sigma^2/n}} \leq z_\alpha \right) \sim 1 - \alpha, \quad (7)$$

Onde z_α é a ordenada da $N(0,1)$ de tal forma que sua área de densidade, no intervalo $(-z_\alpha; z_\alpha)$, é igual a 1. Como σ^2 é desconhecido, ele é substituído por seu estimador não viciado s^2 , que para n grande é bem próximo de σ^2 . O tamanho da amostra é considerado grande quando $n > 25$ (MANN, 2006). Assim, a Eq. 3 pode ser reescrita como a Eq. 8.

$$P \left(\bar{y} - z_\alpha \sqrt{\frac{s^2}{n}} \leq \mu \leq \bar{y} + z_\alpha \sqrt{\frac{s^2}{n}} \right) \approx 1 - \alpha, \quad (8)$$

E,

$$\left(\bar{y} - z_\alpha \sqrt{\frac{s^2}{n}} ; \bar{y} + z_\alpha \sqrt{\frac{s^2}{n}} \right) \quad (9)$$

A Eq. 9 denota o intervalo de confiança para μ com coeficiente de confiança aproximadamente igual a $1 - \alpha$. A interpretação por meio da frequência do intervalo de confiança está baseada no fato de que se forem observadas 100 amostras aleatoriamente

simples, e construídos 100 intervalos de confiança baseados nestas amostras, então aproximadamente 100 (1- α) % dos intervalos devem conter μ .

A determinação do tamanho da amostra n deve ser de tal forma que o estimador obtido tenha um erro máximo de estimação igual a B , (Eq. 10), com determinado grau de confiança (probabilidade).

$$P(\bar{y} - \mu \leq B) \approx 1 - \alpha \quad (10)$$

De acordo com a Eq. 10 e para n suficientemente grande, tem-se a Eq. 11.

$$P\left(\bar{y} - \mu \leq z_\alpha \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}\right) \sim 1 - \alpha \quad (11)$$

Então, para B fixado, comparando as Eqs. 10 e 11, a solução para o problema consiste em calcular n de tal forma que a Eq. 12 seja:

$$B = z_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (12)$$

Ou ainda,

$$\frac{B^2}{z_\alpha^2} = \frac{\sigma^2}{n} \quad (13)$$

Resolvendo,

$$n = \frac{\sigma^2}{(B/z_\alpha)^2} \quad (14)$$

Para obter o tamanho da amostra (n), é preciso ter um conhecimento a priori da variabilidade da população (σ^2), fixar o erro máximo desejado (B), com algum grau de confiança (z_α). B e z_α são definidos pelo pesquisador, enquanto que para σ^2 é necessário realizar uma pesquisa mais aprofundada sobre o comportamento da população. com base em investigações semelhantes ou com uma amostra piloto. Uma sugestão menos dispendiosa seria considerar um intervalo onde aproximadamente 95% dos indivíduos da população estariam concentrados, e igualar ao comprimento do intervalo igual a 4σ , como valor estimado para σ^2 . Isto se fundamenta no fato de que, no intervalo compreendido entre a média menos dois desvios padrões e a médios mais dois desvios padrões, tem-se populações

(aproximadamente) simétricas.

Os padrões de exatidão não especificam as regras de obtenção do número mínimo de elementos a serem amostrados (PEREIRA; NERO, 2015; ARIZA; ATKINSON, 2008; CELESTINO; ROCHA, 2008). As recomendações variam de, no mínimo, 20 pontos (MERCHANT, 1982, EMAS, ASLMS, NSSDA: PEC-PCD) até 167 pontos (STANAG). Na proposta de Atkinson (2005), é recomendada uma amostra de pelo menos 100 pontos de checagem. NDEP (2004) recomenda que sejam amostrados 20 pontos por categoria de uso do solo. Assim, numa área a ser testada, se houver 5 categorias, serão necessários 100 pontos.

Nogueira Júnior et al. (2004) realizaram um estudo sobre tamanho amostral para produtos vetoriais com base na fórmula de Pereira (1979) e nos estudos de Rocha (2002). Foram analisados o erro permitido (1%, 5%, 10%, 33%), o desvio padrão com referência no PEC para a Classe A da escala 1:2000 e o parâmetro z (da distribuição normal) para produtos analógicos. Concluíram que, em se adotando uma fonte de comparação com precisão 3 vezes maior que a precisão do produto a ser avaliado, o tamanho da amostra, tanto para uma população infinita como finita, se estabiliza em 24 pontos a partir da escala 1:1000 para $Z = 1,64$ e com 90% de nível de confiança (Figura 13). Merchant (1982) já havia demonstrado que o tamanho mínimo da amostra seria de 20 pontos e esse valor é recomendado por diversos padrões de exatidão cartográfica.

Figura 13 - Tamanho da amostra para checagem variando de 1 a infinito, para diferentes valores de Z

Fonte: Nogueira Jr. et al, 2004.

Celestino e Rocha (2008) adaptaram a fórmula proposta por Pereira (1979) para estimar tanto o número de pontos de controle para correção geométrica de imagens do sensor QuickBird como o número de pontos de checagem. O tamanho da população foi definido como sendo o número total de pontos contidos na imagem e o erro máximo permitido, o erro e o desvio padrão, relativos à resolução da imagem (Eq. 15).

$$n = \frac{(Z^2 \cdot \gamma^2 \cdot N)}{[(N-1) \cdot \varepsilon r^2] + (Z^2 \cdot \gamma^2)} \quad (15)$$

Em que:

$$\varepsilon r = \frac{\varepsilon}{\mu}$$

$$\gamma = \frac{\sigma}{\mu}$$

n = tamanho da amostra para correção geométrica

N = tamanho da população (pontos identificados na imagem)

Er = erro amostral relativo, 0,15.μ

ε = erro amostral

μ = resolução da imagem (m)

σ = 1/3. m

Z_(90% distribuição Normal) = 1,6449 (PEC-PCD)

ASPRS (2015) recomenda adotar no mínimo 20 pontos de checagem e distingue área vegetada de área não vegetada. Este padrão refere-se ao uso de laser scanner para coletar os pontos de checagem e recomenda que o tamanho da amostra seja em função da área e do que se pretende verificar, podendo ser apenas planimetria, altimetria, ambos ou modelos digitais do terreno. Na Tabela 8 é apresentado o número de pontos de teste, recomendado em função da área superficial e do tipo de cobertura.

Como pode ser observado na Tabela 8, é recomendado um mínimo de 20 pontos de checagem para uma área de até 500 km², onde a cada adicional de 250 km² é acrescentado 5 pontos. Para áreas superiores a 2500 km², o usuário pode definir o número de pontos

adicionais em função da resolução da imagem ou da extensão de urbanização.

Tabela 8 - Número de pontos de checagem da exatidão horizontal planimétrica e de ortoreferência e da exatidão horizontal e vertical de elevação, de acordo com a cobertura do solo

Área do projeto (km ²)	Teste de exatidão horizontal planimétrica e de ortoreferência	Teste de exatidão horizontal e vertical de um conjunto de pontos de elevação		
	Número total de pontos de checagem 2D/ 3D bem definidos	Número de pontos de checagem 3D estático em área não vegetada	Número de pontos de checagem 3D estático em área vegetada	Número total de pontos de checagem 3D estático
< = 500	20	20	5	25
501 – 750	25	20	10	30
750 – 1000	30	25	15	40
1001 – 1250	35	30	20	50
1251 – 1500	40	35	25	60
1501 – 1750	45	40	30	70
1751 – 2000	50	45	35	80
2001 – 2250	55	50	40	90
2250 – 2500	60	55	45	100

Fonte: ASPRS, 2015.

Para teste vertical em área maior que 2500 km², a ASPRS (2015) recomenda acrescentar 5 pontos de checagem a cada 500 km² adicionais, sendo 3 pontos para áreas não vegetadas e 2 pontos para áreas vegetadas. O número de pontos e a distribuição devem variar de acordo com a cobertura do solo e a importância da área, de acordo com a solicitação do cliente.

Os pontos de checagem vertical não precisam ser feições claramente definidas. Pontos coletados pelo método cinemático de posicionamento por satélite podem ser usados em qualquer quantidade, como dados suplementares. Mas, o ideal é que sejam usados pontos obtidos pelo método estático, o qual estabelece exatidão de 5 cm para alturas elipsoidais com 95% de confiança (USGS, 1994).

No Brasil, o PEC-PCD para produtos digitais e simplesmente PEC para produtos analógicos não apresentam um método para calcular o número de pontos de checagem e nem como deve ser a sua distribuição na área a ser verificada (NOGUEIRA JÚNIOR; MONICO; TACHIBANA, 2004; CELESTINO; ROCHA, 2011; PEREIRA; NERO, 2012). O padrão de exatidão brasileiro adota a recomendação feita por Merchant (1982), de pelo menos 20 pontos

de controle obtidos por método, com precisão 3 vezes maior que a da carta.

4.2.2 Espacialização dos Pontos de Checagem

Quanto à distribuição e densidade dos pontos de checagem para testes de exatidão horizontal e vertical, a ASPRS (2015) recomenda aplicar as orientações da NSSDA quando possível, pois estas são adequadas para áreas de formato retangular e não vegetadas, que exigem, no mínimo, que 20 pontos sejam testados e que eles ocupem pelo menos 20% cada quadrante, com espaçamentos de até 10% da diagonal da área levantada, como ilustrado na Figura 14 (FGDC, 1998).

Figura 14 - Distribuição e espaçamentos dos pontos a serem testados para avaliação da exatidão horizontal e vertical de produtos cartográficos digitais

Nos casos em que não seja possível aplicar as recomendações da NSSDA, ASPSR (2015) instrui o especialista fornecedor de dados incluir na análise: o tipo de cobertura do solo, as dificuldades do terreno, as vias de acesso e a relevância da área mapeada, a fim de melhor seleção dos pontos a serem testados, .

Na proposta de Atkinson (2005), o tamanho da amostra parte de uma seleção prévia de pelo menos 100 pontos de controle com fonte 3 vezes mais exata. Estes pontos devem ser marcados perfeitamente na BDG, geralmente representados por cruzamentos e quinas de construções, formando ângulos o mais próximo de 90°. Deve-se evitar ângulos menores que 25° e maiores que 155°. Estes devem ser examinados quanto a exatidão temporal, pois se a base escolhida for mais antiga, estes podem ter sofrido alguma modificação.

A amostra deve adotar o mesmo sistema de referência da BDG a ser analisada. No caso, se adotar uma simbologia, o ponto amostral será o centro da mesma. Os pontos devem-se distribuir, de forma homogênea na área em análise, quanto à temática e geografia. Assim, recomenda-se 20% em cada quadrante, semelhante à NSSDA. No entanto, o espaçamento entre pontos deve ser no mínimo $1/50$ da maior diagonal (Figura 15), enquanto que em NSSDA, esse espaçamento é de $1/10$.

Figura 15 - Distribuição e espaçamento de pontos de controle

Fonte: Atkinson, 2005.

4.2.3 Feições Lineares de Controle

A análise da exatidão posicional de produtos cartográficos por meio de feições lineares tem sido objeto de vários estudos há algumas décadas, onde diferentes técnicas de avaliação tem sido desenvolvidas (RUIZ-LENDÍNEZ; ARIZA-LÓPEZ; UREÑA-CÁMARA, 2013; GIL DE LA VEGA; ARIZA-LÓPEZ; MOZAS-CALVACHE, 2016). De acordo com Santos et al. (2015), o uso de feições lineares, como método de avaliação da exatidão posicional, busca comparar a linha teste em relação à linha tida como referência. Alguns aspectos são avaliados, tais como quantidade de vértices, angularidade, razão entre os comprimentos, índices de sobreposição e interseções.

Santos et al. (2015) compararam os resultados da exatidão posicional de imagens, através do sensor IKONOS (1 m de resolução espacial), da bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, no município de Viçosa (MG), por meio da avaliação de pontos e feições lineares com *buffers* cujas larguras foram estabelecidas com base no PEC e no ET-ADV.

Estes autores observaram que o método de avaliação por feições lineares foi mais restritivo que o método por ponto.

Feições lineares foram aplicadas na análise de exatidão horizontal de ortofoto gerada com câmera não métrica, embarcada em hexacoptero. Estas obtiveram discrepâncias médias, da ordem de 20 cm, sendo o produto acurado posicionalmente para a escala de 1:1000. Assim, tal produto pode ser utilizado para fins de gestão de serviços rurais, tais como CAR, áreas de assentamento, agricultura familiar, regularização e planejamento ambiental, zoneamento ecológico econômico, identificação de comunidades rurais e georreferenciamento de imóveis rurais (FONSECA NETO et al., 2017).

Ariza-López et al. (2011) avaliaram a influência do tamanho de amostras lineares na variabilidade da estimativa estatística de eixos de rodovias. Concluíram que amostras de 200 km melhoram os resultados em até 4,5 vezes, quando comparadas com amostras de 10 km.

4.3 O MDT de Controle

A análise da informação altimétrica em BDG, em formato digital, é tratada de forma substancialmente diferente a aplicada à informação horizontal. Deve-se considerar os seguintes aspectos: algoritmo para geração do MDE (em termos de malha regular, triangulação, entre outros), tratamento prévio de valores atípicos e representação da altimetria dos BDG (sem nenhum elemento visível na planta, sólido 3D, textura, curvas de nível e curvas hipsométricas) (ATKINSON GORDO, 2005).

Na avaliação da exatidão de MDEs, um ponto de controle coincidente ao nó da malha é pouco provável. USACE (2002) e FEMA (2003) trazem algumas referências para o uso de perfis do terreno com 127 mm na escala do mapa e que interceptem pelo menos 10 curvas de nível.

O ajuste de dois MDEs da área de um porto na Holanda foi avaliado com grides de 25 e 2 metros. Numa área de 41,2 hectares foram amostrados 137 pontos. A posição x e y foram determinadas com GPS RTK, a partir de duas bases no modo estático e as alturas foram conseguidas por nivelamento. As diferenças das alturas medidas com GPS RTK e nivelamento foram inferiores a 2 cm. Dos 137 pontos, 50 foram amostrados randomicamente e 87 dispostos numa malha regular a cada 200 metros. Para a amostragem com base no desenho, o tamanho da amostra foi igual a 12 e, com base no modelo, foram selecionados 44

pontos que foram modelados por krigagem ordinária. Os resultados mostraram que o volume e desvio padrão da estratégia, baseada no modelo, apresentaram resultados 20% menores que os valores obtidos por amostragem baseada no projeto (BRUIN; BREGT; VEN, 2001).

Uma vez que pontos de checagem encontram-se livres de erros grosseiros, elevações correspondentes a cada conjunto de pontos podem ser verificadas a partir dos dados interpolados na posição X e Y de um MDE ou interpolador TIN. Isso é válido para verificação da exatidão de MDE, uma vez que é quase impossível testar o mesmo ponto no modelo e no terreno.

Há três possibilidades de checagem a partir de pontos derivados. A primeira, um TIN derivado de uma nuvem de pontos fornece uma superfície da qual as elevações podem ser obtidas na localização dos pontos de checagem. Outra maneira é a partir do MDE criado a partir de uma grelha, em que as elevações de superfícies nos pontos de verificação podem ser interpoladas utilizando um interpolador adequado. E a terceira, por meio da interpolação de curvas de nível obtidas por estereoscopia, TIN ou MDE. Os pontos de checagem são lançados entre as curvas de nível e sua elevação é determinada. Outra maneira é o caso de TIN ou MDE gerado a partir das curvas de nível, onde a determinação da elevação na posição do ponto de checagem é automática. Porém, sujeita a interferência dos métodos de interpolação, generalização e de suavização.

4.4 Estimadores Robustos

Forçar a normalidade nos erros de observações Geodésicas e Astronômicas é uma prática comum quando a função de distribuição das observações não é normal, porém próxima da normal. A média amostral tem um comportamento muito ruim como estimador da população e, normalmente, as técnicas habituais de máxima verossimilhança não são adequadas para análise dos dados (BUSTOS, 1981). Daí, a necessidade de se adotar uma alternativa à média, denominado estimador robusto.

Hampel (1973) justifica o uso de estimadores robustos na análise de qualidade das observações. Primeiro é que a estatística clássica baseia-se em modelos paramétricos, nos quais partem de um número limitado de amostra e, segundo, considera a distribuição de probabilidades de erros como sendo uma distribuição normal. Essa hipótese nem sempre é verificada. As principais razões para os desvios são: 1) arredondamento, agrupamento e outras

inexatitudes locais; 2) existência de erros grosseiros nas observações e transcrições (cópia) e 3) o modelo foi concebido apenas como uma aproximação, por exemplo, em virtude do teorema do limite central.

Este autor diz, ainda, que estimadores robustos devem ser empregados quando há dúvidas acerca do modelo estatístico, sobre a qualidade da amostra ou, ainda, incerteza sobre as decisões adotadas. Podendo ser suficiente executar a limpeza dos dados, a fim de excluir observações atípicas e, em seguida, utilizar a estimação por meio de estatística clássica nos dados restantes. Mas isso nem sempre funciona, e recomenda o uso de estimadores robustos.

Domingo (2000) comenta a importância de se trabalhar com estimadores robustos quando se tem uma amostra relativamente pequena (por exemplo, 20), onde não se podem excluir dados. Ela recomenda o método de Danés e de German MacClure para aplicações em fotogrametria.

Os padrões de exatidão cartográfica pressupõem que as observações tanto da BDG quanto da fonte de maior exatidão estão livres de *outliers*. São considerados *outliers*, valores atípicos e que podem ser analisados por meio de duas categorias, mediante diagramas de Box-Whiskers, onde os maiores que $1,5 \times RQ$ são enquadrados como erros atípicos médios e os maiores que $3,0 \times RQ$ são considerados erros grosseiros. Sendo, RQ o intervalo interquartil entre 1 e 3 em torno da mediana. Alguns métodos consideram *outliers* como os valores que se distanciam mais que $3 \times \sigma$ do valor médio. Atkinson (2005) recomenda aplicar estimadores robustos após selecionar os dados da BDG e de uma fonte mais precisa e, antes de utilizar os padrões cartográficos.

Bustos (1981) comenta que os estimadores – M, máxima verossimilhança, consideram a função das observações uma função normal e, assim, μ é a média. Quando se tem dados que não cumprem uma função normal, a idéia é buscar uma alternativa a esses estimadores. Atkinson (2005) comenta sobre o estimador MVT (*Multivariate Trimming*) e MLT (*Maximun Likelihood Trimming*). Ambos baseiam-se na distância de Mahalanobis (d_i^2). No MVT, calcula-se (d_i^2) e eliminam-se os pontos mais distantes num processo iterativo, enquanto que no MLT d_i^2 é empregada para se determinar o peso das observações, mostrando-se mais eficiente para se determinar a qualidade cartográfica quando se tem amostras pequenas, pois utiliza a totalidade dos dados.

4.4 Valores Atípicos e o Erro Esperado

Valores atípicos ou *outliers* são aqueles que são excessivamente grandes ou pequenos, mas não necessariamente são erros grosseiros. Pertecem a uma função de distribuição do fenômeno, porém a inclusão deles na análise estatística tradicional vai influenciar fortemente nos resultados, por introdução de erros sistemáticos e maiores desvios. Se por um lado, sua inclusão pode levar a grandes desvios, a sua exclusão expõe ao risco de tomada de decisão sobre uma não realidade. Geralmente, é realizada uma sondagem cuidadosa sobre esses valores, onde estes são apresentados nos relatórios a fim de informar o perigo de suas circunstâncias (ATKINSON GORDO, 2005).

Em muitos campos, como em aplicações de engenharia, dados amostrais apresentam em torno de 10% de erros grosseiros, podendo chegar até 20%. Sendo mais comum, entre 5% e 10% (HAMPEL, 1985). Métodos estatísticos robustos têm sido usados para detectar valores atípicos em problemas fotogramétricos (DOMINGO, 2000a, 2000b).

Os dados devem ser analisados para se definir um desvio padrão a priori (erro esperado) e um limite de confiança que serão contrastados com o desvio da amostra. (CINTRA; NERO, 2005) descrevem o erro esperado (Eq. 16) no produto derivado da aerofotogrametria, de acordo com as diversas fases do processo e supondo que não haja correlação entre elas, ou seja, que elas sejam independentes. Comentam, ainda, que o erro do operador (humano) não é possível mensurar, este apenas poderá ser detectado na avaliação final da precisão do produto.

$$\sigma_{priori} = (\sigma_{apoio}^2 + \sigma_{foto}^2 + \sigma_{aerot}^2 + \sigma_{orient}^2 + \sigma_{coleta}^2)^{0,5} \quad (16)$$

Em que:

σ_{priori} = erro esperado no produto final ou desvio a priori;

σ_{apoio} = erro do processo de coleta de coordenadas horizontais e verticais dos pontos de apoio;

σ_{foto} = erro devido à resolução da imagem;

σ_{aerot} = erros de ajustamento matemático da aerotriangulação de um bloco de fotografias no processo de aerotriangulação;

σ_{orient} = erros do posicionamento do par fotogramétrico no equipamento durante o processo de orientação;

σ_{coleta} = erros de coleta de dados espaciais durante o processo de restituição.

Celestino e Rocha (2008) descreveram os erros cometidos na geração de produtos cartográficos, a partir de imagens orbitais de alta resolução, do sensor Quickbird a fim de definir o erro esperado conforme a (Eq. 17).

$$\sigma_{priori} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_5^2 + \sigma_6^2} \quad (17)$$

σ_1 : Erro da coleta de coordenadas horizontais por meio de sistema de navegação por satélite;

σ_2 : Erro da coleta de coordenadas horizontais por meio de topografia;

σ_3 : Erro de graficismo (0,2 mm);

σ_4 : Erro de georreferenciamento da imagem em função da resolução (na imagem do sensor Quickbird é de 700 mm);

σ_5 : Erro de vetorização de feições na imagem;

σ_6 : Erro de vetorização em função da resolução da imagem.

4.5 Hipóteses Prévias

Os métodos estatísticos partem de uma hipótese prévia que deverá ser satisfeita para validar as conclusões. A maioria das normas de avaliação tem como pressuposto que os erros são randômicos e apresentam uma distribuição normal (modelo Gaussiano), o que nem sempre se verifica (ASPRS, 2015).

As hipóteses básicas sobre a amostragem são as seguintes: independência dos dados, normalidade e aleatoriedade. A independência da amostra de dados posicionais é verificada se há alguma relação entre o valor das discrepâncias e a distância entre elas. Santos (2015) aplicou a análise do semivariograma para verificar a independência amostral em cartas, na escala 1:50000 do IBGE. Ariza e Atkinson (2008) comentam que a maioria dos padrões de avaliação de exatidão pressupõe a independência dos dados, mas não indica uma maneira de avaliar.

Atkinson (2005) não faz menção a análise da independência dos dados, mas trata da

verificação da aleatoriedade das discrepâncias por meio de testes não paramétricos. Ele recomenda o teste de sequência com base na mediana. Santos (2015) não trata da aleatoriedade em sua proposta, mas considera que se a independência for confirmada, por conseguinte, a amostra apresenta distribuição aleatória.

A maioria dos padrões de verificação da exatidão pressupõe a normalidade dos dados. ASPRS (2014) recomenda que sejam realizados estudos para amostras que se distribuem de forma livre ou não normal. Mann (2006) apresenta o Teorema de Chebychev para estimar a probabilidade da amostra que se encontra num dado intervalo da curva de distribuição não normal.

No que se refere à normalidade das discrepâncias nas coordenadas, Atkinson (2005) usou da função Kolmogorov-Smirnov e D'Agostinho para testar. Santos (2015) aplicou o teste de Shapiro-Wilk. Este último recomenda aplicar o Teorema do Limite Central (TLC), caso a amostra seja independente e o primeiro teste não se confirme para a normalidade. Para amostra dependente, sugere a modelagem geoestatística e aplicação do teste de normalidade sobre o resíduo padrão.

4.5.1 Teste de Independência das Discrepâncias Amostrais

Independência entre os dados deve ser verificada após a exclusão de *outliers* e antes de se realizar o teste de normalidade. Assim, verifica-se se há alguma correlação espacial entre as discrepâncias e as distâncias entre os pontos de checagem. Embora, seja da natureza de dados geográficos apresentarem alguma correlação espacial, busca-se evidenciar se há dependência ou não entre os dados, a fim de selecionar os testes estatísticos mais adequados para cada caso.

A independência dos dados pode ser feita por análise geoestatística, que de acordo com Santos (2015), não pressupõe que as amostras originam de uma população com função de distribuição normal. O semivariograma experimental de cada discrepância posicional (EN e h) é obtido a partir do cálculo das semivariâncias $\gamma(h)$ dada pela Eq.18.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \cdot \sum_{i=1}^n [dp(x_i) - dp(x_i + h)]^2 \quad (18)$$

Em que:

$N(h)$ é o número de pares de valores de discrepâncias posicionais $dp(x_i)$ e $dp(x_i + h)$ separados por uma distância h .

O semivariograma experimental é representado por um gráfico, onde o eixo das ordenadas corresponde às semivariâncias e o eixo das abscissas, a distância entre os elementos da amostra. De acordo com Santos (2015), a correlação amostral ocorre até o ponto em que semivariância das discrepâncias se estabiliza no semivariograma, ou seja, quando atinge o patamar a uma distância denominada alcance. Após esse ponto, as discrepâncias são independentes. A Figura 16 mostra o semivariograma para dados com dependência espacial. Em (a) observa-se um modelo teórico ajustado, com todos os elementos característicos de um semivariograma, tais como, o alcance, o efeito pepita e a contribuição. Já em (b), não houve correlação entre as discrepâncias, ou seja, são independentes.

Figura 16 - Elementos do semivariograma para dados com (a) dependência espacial e (b) para dados independentes

Fonte: Santos, 2015.

Caso seja verificada a independência dos dados, segue-se com a análise da normalidade e aleatoriedade. Caso haja correlação entre as discrepâncias, ajusta-se o modelo teórico, podendo ser exponencial, esférico ou gaussiano para semivariogramas com patamar e de potência, para os sem patamar. Após a modelagem do semivariograma, faz-se o ajustamento por alguma técnica como mínimos quadrados ordinários, mínimos quadrados

ponderados, máxima verossimilhança e ou máxima verossimilhança restrita. Em seguida, faz-se a validação cruzada dos dados gerando o resíduo padronizado e determina-se o coeficiente de correlação (R^2). O resíduo padronizado é independente, normal, não tendencioso e homogêneo (SOARES, 2000; YAMAMOTO; LANDIM, 2013; SANTOS, 2015). Verifica-se, então, a correlação (R) dos resíduos padronizados com as discrepâncias posicionais (Tabela 9).

Tabela 9 - Classes de correlação entre resíduo padronizado e ações a serem tomadas na análise de independência das discrepâncias

Correlação entre resíduo padronizado e discrepância	Classificação	Ação
$R \geq 0,6$	Correlação forte	Seguir com análise de exatidão com base no resíduo padrão.
$R < 0,6$	Correlação fraca	Revisar semivariograma e checar se o número de dados é suficiente.

Fonte: Santos, 2015.

4.5.2 Teste de Normalidade para As Amostras de Discrepâncias

Quanto à normalidade, a hipótese nula é de que os erros se distribuem numa função gaussiana (normal). No entanto, como relatado por vários autores, a maioria dos padrões de exatidão de produtos cartográficos não considera a distribuição livre dos dados. ASPRS (2015) recomenda que se realizem estudos de exatidão para dados que não se distribuem numa função normal.

Os dados de posição EN geralmente apresentam uma distribuição normal, a partir de 20 pontos amostrais. Assim, são satisfeitos por meio de testes paramétricos e os estimadores, média, desvio padrão e RMSE, representam satisfatoriamente a qualidade da população de uma BDG. Como relatado em USGS (1998), a normalidade não se verifica com a mesma frequência para a distribuição das discrepâncias das elevações, que geralmente apresenta uma distribuição livre. Assim, a hipótese prévia deve ser baseada em métodos não paramétricos, com base na mediana, por exemplo, que são mais robustos (ATKINSON GORDO, 2005; MANN, 2006).

O teste de Shapiro-Wilk (1965) consiste na determinação do valor W , dado pela Eq. 19:

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (19)$$

Sendo b dado por

$$b = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n/2} a_{n-i+1} \times (x_{(n-i+1)} - x_{(i)}) & \text{se } n \text{ é par} \\ \sum_{i=1}^{(n+1)/2} a_{n-i+1} \times (x_{(n-i+1)} - x_{(i)}) & \text{se } n \text{ é ímpar} \end{cases}$$

Em que a_{n-i+1} são constantes geradas pela média, variância e covariância das estatísticas de ordem de uma amostra de tamanho n de uma distribuição normal.

Os padrões de verificação da exatidão presumem que pelo menos 90% dos dados enquadrem-se num intervalo da média mais duas vezes o desvio padrão. Essa condição só é conseguida quando a hipótese nula é atendida. Quando a hipótese alternativa é confirmada, ou seja, as discrepâncias não apresentam uma distribuição normal, testes estatísticos não paramétricos, apesar de menos seguros que testes paramétricos, podem caracterizar a real condição dos dados.

O teorema de Chebyshev, segundo Mann (2006), é aplicável a uma distribuição de probabilidades de qualquer formato. É válida para um fator “ k ” (multiplicador do desvio padrão) maior que 1, onde pelo menos $(1 - 1/k^2)$ dos valores de dados se posicionam dentro dos limites de k vezes o desvio padrão em relação à média aritmética. Este teorema permite estimar se a porcentagem de pontos verificados está dentro de um intervalo para uma distribuição livre. Por exemplo, para um limiar de duas vezes o desvio padrão, tem-se que pelo menos 75% dos dados posicionados estaria neste intervalo, enquanto que na distribuição normal, é presumido que 90% dos dados estariam nesse intervalo.

4.5.3 Teste de Aleatoriedade para as Amostras de Discrepâncias

O teste mais empregado para verificar a aleatoriedade dos dados é o teste de sequências ou *Runs Test* (Bradley, 1968 *apud* Mann, 2006). Atkinson (2005) apresenta este teste em sua proposta para verificação da exatidão horizontal por ser fácil de aplicar. Manns (2006) explica que o teste representa uma série com uma ou mais ocorrências consecutivas do mesmo resultado, em uma série de ocorrências, na qual existam somente dois resultados. No caso da análise de aleatoriedade das discrepâncias, as hipóteses prévias definidas são as seguintes:

$$\begin{aligned} H_0 &: \text{discrepâncias são aleatoriamente distribuídas} \\ H_1 &: \text{discrepâncias não são aleatoriamente distribuídas} \end{aligned}$$

Para realização do teste, determina-se a mediana e as hipóteses prévias são elaboradas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} H_0 &: \text{discrepância} \geq \text{mediana} \\ H_1 &: \text{discrepância} < \text{mediana} \end{aligned}$$

A resposta ao teste será do tipo sim ou não, ou + ou -, ou ainda, 0 ou 1. Então, as discrepâncias são separadas em dois grupos: n_1 para as positivas a H_0 e n_2 para as respostas que contrariam H_0 . Em seguida, contam-se o número de arranjos designado por R como sendo o evento de cada sequência de sim ou não (por ex., SSNNNSNSS, $R = 5$). Portanto, R representa uma estatística com sua própria distribuição de amostragem. Os valores críticos de R são determinados de duas maneiras:

- Para n_1 e n_2 menores que 15, usa-se a Tabela de Valores Críticos para um teste bicaudal igual a 0,05. Esta tabela apresenta dois valores críticos (c_1 e c_2) em função de n_1 e n_2 . Esses valores representam os limites para aceitar H_0 .
- Para n_1 ou n_2 maiores que 15, pode-se aplicar a aproximação da normal, em que o valor de Z é calculado em função da média de R (μ_R) e do desvio padrão de R (σ_R) (Eq. 20 a 22).

$$Z = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \quad (20)$$

$$\mu_R = \frac{2.n_1.n_2}{n_1+n_2} + 1 \quad (21)$$

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{2.n_1.n_2(2.n_1.n_2-n_1-n_2)}{(n_1+n_2)^2(n_1+n_2-1)}} \quad (22)$$

Com o valor Z e estabelecendo-se o grau de confiança ($0,01 < \alpha < 0,05$), busca-se na tabela da distribuição normal padronizada o valor de $Z_{\text{crítico}}$. Então, toma-se uma decisão aceitando ou não a hipótese nula.

O teste da mediana apresenta como resultado que pelo menos 50% dos pontos testados enquadram-se na hipótese nula com grau de confiança de 95% a 99%, conforme o valor de α estabelecido, atestando a aleatoriedade da amostra.

4.6 Medidas Estatísticas Descritivas

Após os testes para verificação das hipóteses prévias de independência, normalidade e aleatoriedade das discrepâncias amostrais em E, N e h, calculou-se as medidas estatísticas descritivas média, mediana, variância, desvio padrão, RMSE e coeficiente de variação (CV). Se for cumprida a hipótese de normalidade das discrepâncias, testes paramétricos t Student e Qui quadrado podem ser aplicados.

A média das discrepâncias ($\bar{e}_i$) é dada pela Eq. 23, representada pela soma das diferenças entre as coordenadas E, N extraídas do ortomosaico e h extraída do MDT, produtos da fotogrametria através de RPAS (C_{RPAS}) e as coordenadas dos pontos de controle, obtidas no campo via levantamento diferencial GNSS RTK (C_{controle}) e dividido pelo tamanho da amostra (n).

$$\bar{e}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{RPAS} - C_{\text{controle}}) \quad (23)$$

A mediana amostral é representada pela discrepância que ocupa o ponto médio da amostra. Se o tamanho da amostra é um número par, será dada pela média dos dois valores centrais. Se for ímpar, corresponde a um único número que ocupa a posição central da amostra.

O desvio padrão amostral (σ), Eq. 24, representa a dispersão espacial da amostra em torno da média. É usado para indicar a precisão dos pontos de amostragem. É dado pela raiz quadrada do somatório das diferenças entre as discrepâncias em cada ponto (e_i) e a média das discrepâncias ($\bar{e}_i$) dividido pelo número de pontos de checagem menos 1 ($n-1$). A variância é dada pelo quadrado do desvio padrão da amostra.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{i=n} (e_i - \bar{e}_i)^2} \quad (24)$$

O RMSE, Eq. 25, indica o erro médio cometido em cada posição, dado pela raiz quadrada da razão entre o quadrado das discrepâncias e o tamanho da amostra. O RMSE independe do tipo de função da distribuição amostral. Por isso, é bastante utilizado para representar a exatidão de produtos cartográficos.

$$RMSE_c = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} e_i^2} \quad (25)$$

O coeficiente de variação (CV) é dado pela razão entre o desvio padrão e a média amostral (Eq. 26).

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{e}_i} \quad (26)$$

4.7 Erros Sistemáticos e Estimativa do Nível de Incerteza

Parte-se do pressuposto que toda amostragem possui erros sistemáticos. Assim, qualquer cálculo estatístico com essas amostras tem um potencial de estar errada e, desta forma, superestimar ou subestimar o erro na população. A maioria dos padrões não se aprofunda nesta questão. NSSDA diz que antes de sua aplicação, os erros sistemáticos devem ser eliminados. EMAS apresenta um teste estatístico para detectar esses erros, mas não deixa claro como eliminá-los. E STANAG 2215 apresenta um método estatístico para considerar erros sistemáticos e determinar incertezas (ARIZA LÓPEZ; ATKINSON GORDO, 2008). Rocha (2002) aplicou o método de mínimos quadrados para eliminar erros sistemáticos antes

de aplicar testes de exatidão.

Erros sistemáticos podem ser detectados por meio de testes de tendência. Para amostras com distribuição normal, aplica-se o teste t de Student com base na média (VIEIRA; GENRO, 2011; SANTOS et al., 2015; CUNHA et al., 2016). Para amostras de distribuição livre (não normal), Atkinson (2005) recomenda aplicar testes circulares, por exemplo, com base na função de distribuição de von Mises que indicam as direções preferenciais desses erros.

Basicamente, existem duas maneiras de estimar o nível de exatidão posicional de um BDG: por meio da análise do erro médio quadrático (RSME) e através da média da amostra (μ) e desvio padrão (σ). O RSME é um índice que indica a incerteza da posição. Já, μ é uma medida central que quantifica o deslocamento médio (erros sistemáticos) e σ dá uma idéia da dispersão dos dados em torno do valor mais provável ou verdadeiro (ARIZA LÓPEZ; ATKINSON GORDO, 2008).

Ainda de acordo com os mesmos autores, a análise da exatidão por meio μ e σ apresenta vantagens em relação à análise do RSME de um BDG. Os erros sistemáticos podem ser corrigidos por meio de transformações geométricas e embora σ indique a variabilidade dos dados e seja mais difícil tratar, estas informações permitem maior interoperabilidade de dados. Por isso, é largamente empregado nas normas de padronização da exatidão horizontal.

4.7.1 Análise de Tendência por Meio do Teste t -Student

Baseia-se na análise estatística das discrepâncias entre as coordenadas observadas no produto cartográfico em análise e na fonte mais precisa. A hipótese nula é de que a média das discrepâncias na posição EN ou h é igual a zero. A hipótese alternativa é de que a média das discrepâncias é diferente de zero. Assim,

$$H_0: \text{média das discrepâncias EN/h} = 0$$

$$H_1: \text{média das discrepâncias EN/h} \neq 0$$

Então, calcula-se a estatística amostral “ t ” (Eqs. 27 e 28) e verifica-se se este valor está no intervalo de aceitação do teste t Student:

$$t_c = \overline{ec} / \overline{\sigma_c} \quad (27)$$

Em que:

$$\overline{\sigma_c} = \sigma_c / \sqrt{n} \quad (28)$$

onde:

n = tamanho da amostra,

$\overline{ec}$ = média das discrepâncias EN ou h, supondo uma distribuição normal. Para n suficientemente grande (maior ou igual a 30), o teste permanece válido mesmo que a distribuição não seja normal.

$\overline{\sigma_c}$ = desvio padrão médio das discrepâncias E, N ou h.

Certo afastamento de $\overline{ec}$ de zero, tem menor probabilidade de ser explicado meramente pelo acaso e como σ_c é uma medida do grau de heterogeneidade, quanto maior a heterogeneidade, maiores devem ser as diferenças observadas entre as duas medidas para evidenciar uma diferença média real ou significativa entre elas (BARBETA, 2012). O intervalo de confiança do teste t Student é dado pela expressão:

$$/ tc / = t((n-1; \alpha/2))$$

Se a estatística / tc / estiver fora do intervalo de confiança, rejeita-se a hipótese nula e a coordenada em análise apresenta tendência. De acordo com Vieira e Genro (2011), uma vez detectada a tendência na amostra há indícios de erros sistemáticos ocorridos durante a coleta dos dados e/ou devido aos parâmetros adotados durante o processamento digital das imagens.

O teste t Student aplicado às medias das discrepâncias, também, pode ser utilizado para realização do teste de dados pareados. Neste, a hipótese nula é de que não há diferença entre os métodos usados na aquisição dos dados e a hipótese alternativa é de que há diferença entre os métodos de aquisição de dados (BARBETA, 2012). Assim, este teste serve para indicar se há diferenças entre os grupos analisados. Neste caso, os grupos são as posições dos pontos de controle obtidas através do GNSS diferencial RTK e extraídas do ortomosaico e MDT da aerofotogrametria através de RPAS.

4.7.2 Estatística Circular

Problemas estatísticos em que as medidas são representadas por direções ou ângulos no plano (dados circulares) e no espaço (dados esféricos) têm crescido em vários campos de pesquisa como, por exemplo, na entomologia (BRIGHENTI et al., 2014), na migração de pássaros, na direção de ventos e nos escorregamentos glaciais (FISHER, 1993). Atkinson (2005) avalia a estatística circular como uma ferramenta poderosa para análise de dados geográficos. Quando se trata de fotografias aéreas, é possível detectar padrões de orientação linear. Os estimadores circulares possibilitam detectar possíveis padrões de orientação linear quando aplicados a fotografias e imagens aéreas. Assim, podem-se detectar comportamentos sistemáticos quanto a sua direção (ATKINSON, 2005).

Semelhante à estatística clássica, para a realização da estatística circular, é necessário conhecer a função de probabilidades dos dados. Atkinson (2005) recomenda a distribuição de von Mises (1918) que opera de forma semelhante à distribuição normal, com dois parâmetros que indicam suas características: direção média (θ) e parâmetro de concentração (k).

A distribuição de probabilidades de von Mises está para dados circulares assim como a distribuição de Gauss está para dados lineares (MARDIA; JUPP, 2000). Para Jammalamadaka e Sen-Gupta (2001), uma variável aleatória circular “Y” tem distribuição de von Mises com parâmetros μ e k , se sua função densidade de probabilidade for dada por:

$$f(y, \mu, k) = \frac{1}{2\pi I_0} \exp[k \cos(y - \mu)] \text{ para } 0 \leq y \leq 2\pi; 0 \leq \mu \leq 2\pi; \text{ e } k > 0$$

Onde $I_0(k)$ é a função de Bessel modificada de 1º tipo e ordem zero, que é dada pela série:

$$I_0(k) = \sum_{r=0}^{\infty} \frac{1}{r!^2} \left(\frac{1}{2}k\right)^{2r}$$

Como citado por Atkinson (2005), a distribuição de von Mises é unimodal e simétrica em relação a direção média ($\bar{R}$). Quando aumenta o parâmetro de concentração (k), aumenta a probabilidade de se observar uma direção muito próxima da direção média. Quando k se aproxima de zero, indica que todas as direções são igualmente prováveis e a distribuição tende para uma circular uniforme, Figura 17 (MARDIA; JUPP, 2000). No Anexo 2, são

apresentados limites máximos de k em função de R .

Figura 17 - Distribuições de Von Mises com diferentes parâmetros de concentração

Fonte: Otieno, 2002.

O teste de Watson ($0,01 < \alpha < 0,05$) permite verificar se os dados circulares se ajustam à distribuição de von Mises. Uma vez constatada a adequacidade do ajuste, estima-se a máxima verossimilhança dos parâmetros média circular (μ) e de concentração, $kappa$ (k), para posteriormente gerar a curva de densidade de probabilidade (Brighenti et al.; 2014).

Dada uma série de vetores unitários, sua direção predominante é representada pela resultante das coordenadas X , Y e o ponto final do vetor unitário, cuja direção é formada por seu azimute (θ). Estes são dados pelas Equações 29 a 31, (JAMMALAMADAKA; SENGUPTA, 2001).

$$X_i = \cos \theta \quad e \quad Y_i = \sin \theta \quad (29)$$

Considerando

$$S = \sum_{i=1}^n \sin \theta \quad e \quad C = \sum_{i=1}^n \cos \theta \quad (30)$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{S}{C}\right) \quad (31)$$

E a resultante R é dada pela Eq. 32:

$$R^2 = S^2 + C^2 \quad (32)$$

A média circular de $\theta_1; \theta_2; \dots; \theta_n$ é definida como sendo o ângulo $\bar{\mu}$ correspondente ao vetor resultante, que deve satisfazer as seguintes condições (Eq. 33 e 34):

$$\cos(\bar{\mu}) = \frac{C}{R} \quad (33)$$

$$\text{sen}(\bar{\mu}) = \frac{S}{R} \quad (34)$$

Se:

$$\bar{\mu} = \left\{ \begin{array}{l} \text{atan}\left(\frac{S}{C}\right), \text{ se } S \geq 0 \text{ e } C > 0; \\ \text{atan}\left(\frac{S}{C}\right) + \pi, \quad \text{se } C < 0; \\ \text{e} \\ \text{atan}\left(\frac{S}{C}\right) + 2\pi, \text{ se } S < 0 \text{ e } C > 0 \end{array} \right\}$$

A magnitude da resultante R fornece uma informação sobre o grau de concentração dos ângulos observados. Assim, quanto maior a dispersão da amostra, menor a resultante (Figura 18) (OTIENO, 2002). Então, para se comparar duas resultantes é mais comum usar o comprimento médio, $\bar{R}$ (Eq. 37), no qual tem a vantagem de variar no intervalo [0,1]. A variância circular amostral ou parâmetro de concentração (V) e o desvio padrão circular (σ_c) são definidos pelas equações 38 e 39.

$$\bar{C} = \frac{N_r}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos \theta \quad (35)$$

$$\bar{S} = \frac{E_r}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sen } \theta \quad (36)$$

Figura 18 - Resultante em função da dispersão de vetores. (a) Menor dispersão, maior resultante e (b) maior dispersão, menor resultante

Fonte: Atkinson, 2005.

Desta forma, o vetor resultante ($\bar{R}$) informa sobre a direção média da amostra e a distribuição dos vetores sobre ele. É dado por uma componente quadrática e está compreendido no intervalo $[0,1]$ (Eq. 42 a 44).

$$\bar{R} = \frac{R}{n} = \sqrt{\bar{C}^2 + \bar{S}^2} \quad (37)$$

$$V = 1 - \bar{R} \quad (38)$$

$$\sigma = \sqrt{-2 \cdot \ln \bar{R}} \quad (39)$$

A variância mínima ocorre quando $V = 0$, ($\bar{R} = 1$) e corresponde a todas as observações estarem precisamente no mesmo local. O maior limite possível de variação ocorre para dados uniformemente distribuídos ao redor do círculo, e corresponde a $V = 1$, ($\bar{R} = 0$). O cálculo de $\bar{R}$ é bastante simples e a interpretação dos resultados não depende de suposições sobre os dados originais (OTIENO, 2002).

4.7.2.1 Teste de Significância da Estatística Circular

O teste de significância da estatística circular ou teste de Hayleigh baseia-se nas hipóteses prévias formuladas em relação a média direcional:

H_0 : a amostra possui média direcional

H_1 : a amostra não possui média direcional

A decisão é tomada sobre o valor de Z calculado em função do tamanho da amostra e da resultante direcional (Eq. 40). Então, $Z_{\text{calculado}}$ é comparado com valor de Z_{tabelado} do teste de Hayleigh.

$$Z_{\text{calculado}} = n \cdot R^2 \quad (40)$$

Se $Z_{\text{calculado}} < Z_{\text{tabelado}}$, aceita-se H_0 ao nível de significância de 0,05 e conclui-se que a amostra possui média direcional. Do contrário, rejeita-se H_0 .

4.7.2.2 Teste de Uniformidade para Estatística Circular

Os azimutes formados pelas discrepâncias E e N apresentam distribuição uniforme, caso suas posições no círculo geográfico forem uniformes com base nas seguintes hipóteses:

H_0 : a distribuição dos azimutes é uniforme

H_1 : a distribuição dos azimutes não é uniforme

O círculo geográfico é dividido em 8 partes iguais, de 45° em 45°, onde são considerados azimutes Norte todos que se localizarem entre os azimutes 337,5° e 22,5°, nordeste entre 22,5° e 67,5° e assim por diante, como é apresentado na Tabela 10. Sendo o tamanho da amostra maior que 30, calcula-se o valor de Qui quadrado para a amostra com base na frequência de ocorrência dos azimutes em cada categoria (f_i), em relação a frequência absoluta ($\hat{f}_i$) dados pelas Eqs. 41 e 42.

Tabela 10 - Categorias de azimutes para teste de uniformidade da estatística circular

Categoria de Azimutes	Localização	Frequência (f_i)
337,5° – 22,5°	Norte	n ₁
22,5° – 67,5°	Nordeste	n ₂
67,5° – 112,5°	Leste	n ₃
112,5° – 157,5°	Sudeste	n ₄
157,5° – 202,5°	Sul	n ₅
202,5° – 247,5°	Sudoeste	n ₆
247,5° – 292,5°	Oeste	n ₇
292,5° – 337,5°	Noroeste	n ₈

$$\chi_{cal}^2 = \sum \frac{(f_i - \hat{f}_i)^2}{\hat{f}_i} \quad (41)$$

$$\hat{f}_i = \frac{n}{8} \quad (42)$$

Então, confronta-se χ_{cal}^2 com $\chi_{crítico}^2$ da tabela de $\chi_{(n-1;0,05)}^2$. Se $\chi_{cal}^2 > \chi_{crítico}^2$ rejeita-se a hipótese nula, para n-1 graus de liberdade e nível de confiança de 0,05.

4.7.2.3 Teste de Aleatoriedade

Este teste visa detectar se há aleatoriedade entre dois grupos de origem distintas. Os azimutes formados pelos pares de pontos sequenciais extraídos do ortomosaico RPAS (n₁) e os azimutes formados pelos pares de pontos sequenciais da amostra de controle (n₂) foram ordenados em pontos de ocorrência, na ordem de ocorrência, de modo que o azimuth de cada grupo pudesse ser identificado no conjunto final. Em seguida, contou-se o número de postos formados (U') e calculou-se o valor de Z (Eq. 43). Sendo o tamanho da amostra (N) maior que 20 elementos, pode-se extrair a probabilidade (p) da tabela de distribuição normal para Z_{calculado}, com base nas seguintes hipóteses:

H₀: os azimutes não apresentam significância quanto a aleatoriedade

H₁: os azimutes apresentam significância quanto a aleatoriedade.

$$Z = \frac{u' + 1 - \frac{2 \cdot n_1 \cdot n_2 + N}{N}}{\sqrt{\frac{2 \cdot n_1 \cdot n_2 (2 \cdot n_1 \cdot n_2 - N)}{N^2 (N - 1)}}} \quad (43)$$

4.8 Análise de Precisão por Meio do Teste Paramétrico Qui quadrado.

A análise de precisão pode ser feita comparando-se o desvio padrão das discrepâncias da amostra com o erro padrão (EP) para a classe e escala na qual deseja-se testar o produto cartográfico. Santos (2015) e Atkinson (2005) recomendam usar como EP, o RMSE na coordenada que está sendo testada, EN ou h. O teste de hipótese para a análise é descrito a seguir:

$$\begin{aligned} H_0: s_c^2 &= \sigma_c^2 \\ H_1: s_c^2 &> \sigma_c^2 \end{aligned}$$

O desvio padrão esperado para a posição EN ou h (σ_c) é calculado pela expressão Eq 44.

$$\sigma_c = EP \quad (44)$$

O teste Qui quadrado amostral é dado pela Eq. 45.

$$\chi^2 = (n - 1) \cdot \frac{s_c^2}{\sigma_c^2} \quad (45)$$

Aceita-se a hipótese nula, se a desigualdade for satisfeita, ou seja, o produto cartográfico atende a precisão exigida para a classe testada, para n e $\alpha = 10\%$.

$$\chi_x^2 \leq \chi_{(n-1, \alpha)}^2$$

4.9 Análise de Precisão por Meio do Teste Não Paramétrico (U) de Mann-Whitney

O teste não paramétrico de Mann-Whitney foi utilizado para avaliar a exatidão de quatro modelos de receptores GPS de posicionamento absoluto no levantamento de áreas de

florestas de pinus. Foi realizada a comparação de coordenadas coletadas com estes receptores e com GNSS diferencial. O teste foi capaz de identificar diferenças significativas na precisão dos receptores testados (RODRÍGUEZ-PÉREZ; ÁLVAREZ; SANZ-ABLANEDO, 2007).

O teste U de Mann-Whitney não pressupõe a normalidade dos dados e pode ser aplicado para grupos de amostras de tamanhos diferentes. O valor de significância estima a probabilidade de se obter uma estatística Z mais extrema, em valor absoluto, do que o Z crítico. A hipótese nula é fundamentada em função da mediana. Se esta for confirmada, diz-se que não há diferenças significativas entre os dois grupos, ou seja, os dados pertencem a uma mesma população (MANN, 2006).

Na realização do teste, coordenadas dos pontos homólogos extraídas do ortomosaico e do MDT foram juntadas com as dos pontos de controle coletados com GNSS diferencial RTK. Os testes foram conduzidos para E, N e h de forma independente. Em seguida, os dados foram ordenados de forma crescente e cada posição recebeu um valor sequencial. Então, as coordenadas dos pontos de controle foram isoladas em ordem crescente de acordo com suas posições, onde se fez o somatório destas posições e determinou-se R1. Adicionalmente, se fez a soma dos postos da amostra remanescente, ou seja, dos dados extraídos do ortomosaico e do MDT, obtendo-se assim R2.

Para amostras pequenas n_1 e $n_2 < 25$, tem-se o seguinte cálculo do teste U (Eq. 46 e 47):

$$U_{min} = (U_1, U_2)$$

$$U_1 = n_1 \cdot n_2 + \frac{n_1 \cdot (n_1 + 1)}{2} - R_1 \quad \text{Eq. 46}$$

$$U_2 = n_1 \cdot n_2 + \frac{n_2 \cdot (n_2 + 1)}{2} - R_2 \quad \text{Eq. 47}$$

Em que:

U_1 e U_2 = medidas estatísticas do teste de Mann-Whitney, seleciona-se o menor valor;

n_1 e n_2 = tamanho das amostras de dados dos pontos de controle GNSS e homólogos extraídos do ortomosaico e MDT;

R_1 e R_2 = soma dos postos assumidos pelos dados fusionados e ordenados em ordem

crescente para cada amostra.

Após o cálculo de U_1 e U_2 , elegeu-se o menor valor entre os dois. Para amostras pequenas ($n < 20$), utiliza-se a tabela de valores críticos de Mann-Whitney (U). Se U calculado for menor que U tabelado, rejeita-se a hipótese nula. Caso contrário, não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula. No entanto, se $n > 20$, pode-se fazer uma aproximação com a distribuição normal. Desta forma, se estima a medida estatística Z (Eq. 48 a 51).

$$Z = \frac{U_{min} - \mu_R}{\sigma_R} \quad (48)$$

$$\mu_R = \frac{n_1 \cdot n_2}{2} \quad (49)$$

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 + 1)}{12}} \quad (50)$$

Assim,

$$Z = \frac{U_{min} - (\frac{n_1 \cdot n_2}{2})}{\sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 + 1)}{12}}} \sim N(0, 1) \quad (51)$$

As variáveis já foram declaradas anteriormente. Em seguida, compara-se o valor absoluto Z estimado ao valor da tabela de valores para distribuição normal padronizada. No nível de confiança desejado, por exemplo, para 95% de confiança, Z crítico é igual a 1,96. Se $|Z \text{ estimado}|$ for menor que Z crítico, não se rejeita a hipótese nula ao nível de confiança de 95%. E assim, pode-se inferir que não há diferenças significativas entre os dois métodos de coleta de dados de posição.

4.10 Principais Padrões de Exatidão Cartográfica Digital

Um levantamento sobre os principais métodos de avaliação do padrão de precisão posicional de produtos cartográficos da África do Sul, Austrália, Brasil, Estados Unidos,

Japão, México e Portugal é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Principais características de padrões de exatidão cartográfica em alguns países

País	Nº pontos de controle	Indicador Estatístico	Nível de confiança	Método de avaliação	Escalas	Erro Padrão	Fonte
África do Sul	----	M.M.Q.	95%	Conjunta	1:10.000 e 1:50.000	0,26 e 0,36 mm	DRDLR (2010a, b, 2010 c)
Alemanha	Adota normas e especificações de avaliação durante o processo de construção da carta.						
Austrália	20	RMSE	95%	Separada	qualquer	-----	ICMS, 2009
Estados Unidos ¹	Não definido	RMSE	90%	Conjunta	<1:20.000 >1:20.000	0,85 mm 0,58 mm	NMAS, 1947
Estados Unidos ² USGS	>=20	RMSE	95%	Conjunta	1:20.000 a 1:50	0,25 mm x esc.	NSSDA, 1998
Brasil	20	Desvio Padrão RMSE	e 90%	Não definida	1:250.000 a 1:1.000	—	CONCAR – EB (2011)
Japão	-----	Desvio padrão	-----	Conjunta	1:2500 e 1:5000	—	GSI (2010)
México	----	Desvio padrão RMSE	ou 50% e 95%	Conjunta	Qualquer	0,3 a 0,5 mm	INEG (2009)
Portugal	calculado	RMSE	95%	Conjunta	1:1000, 1:2000, 1:5000 e 1:10.000	---	IGP (2004a, 2004b e 2004c)

¹Para mapas analógicos.

²Para mapas digitais.

Fonte: Rocha, 2002; Pereira, Nero, 2012.

Esses autores concluíram que a maioria dos países estudados utiliza o desvio padrão como indicador estatístico e avaliam a precisão em conjunto das posições. Apenas a Austrália recomenda a análise em separado das coordenadas planimétricas. Comentam que há uma fragilidade da avaliação da exatidão no que se refere aos métodos para se estabelecer o número de pontos de controle. Embora a qualidade de produtos digitais dependa da resolução espacial, não se dispensa a análise em função da escala, pois esta dá a indicação da aplicabilidade dos mapas gerados.

Ariza e Atkinson (2008) avaliaram 6 normas de padronização de dados cartográficos: o Padrão de Exatidão do Mapeamento Nacional ou *National Map Accuracy Standard* (NMAS) (USBB, 1947), o Padrão de Exatidão da Engenharia de Mapeamento ou *Engineering*

Map Accuracy Standard (EMAS) (Comitê de Levantamentos Cartográfico, 1983) desenvolvido pela ASCE e seu Comitê de Levantamentos Cartográfico e Divisão de Levantamentos e Mapeamento, os Padrões de Exatidão para mapeamento de grande escala ou *Accuracy Standards for Large Scale Maps* (ASLSM) (ASPRS, 1990), o MIL STD 600001 (DOD, 1990) que é um guia de formulações matemáticas e estatísticas e apresenta especificações e métodos de controle, o Padrão Nacional para Exatidão de Dados Espaciais ou *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA) (FGDC, 1998) e, finalmente, o Padrão de acordo com o Tratado da Organização Norte Atlântica ou Standard Agreement from North Atlantic Treatment Organization (NATO) (STANAG 2215)..

Esses autores organizaram os resultados de suas avaliações sobre os padrões de exatidão posicional até o ano de 2008. Foram acrescentadas PEC-PCD (2011) e ASPRS (2015) que foram modificados para atender produtos cartográficos digitais. Um resumo dos principais aspectos da avaliação dos padrões de exatidão posicional é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Resumo dos aspectos de avaliação de metodologias de exatidão posicional

Nome do padrão	NMAS	EMAS	ASL MS	MILST D 60001	NSSDA	STANAG	PEC- PCD	ASLM S
Origem/Organização	USGS	ASCE	ASPRS	DOD	FGDC	NATO	CONCAR	ASPRS
Ano de Publicação	1947	1985	1990	1990	1998	2002	2011	2014
Tipo de elemento em que o controle é aplicado	Mapa	Área	Folha	Área	Área	Área	Área	Área
Escala: se existe uma recomendação baseada em escalas	Todas	> 20000	> 20000	Todas	Todas	< 25.000	< 1000	Todas
Elementos de controle	Ponto	Ponto	Ponto	Ponto	Ponto	Ponto	Ponto	Ponto
Tamanho mínimo da amostra de controle	-----	20	20	-----	20	167	-----	20
Tipologia dos elementos de controle	-----	-----	-----	-----	-----	Sim	-----	Sim
Distribuição espacial da amostra de controle	-----	-----	Sim	-----	Sim	Sim	-----	Sim
Precisão exigida para amostra de controle em relação a precisão do elemento em análise	-----	3x	3x	-----	3x	5x	3x	3x
Exatidão absoluta	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Exatidão relativa	-----	-----	-----	Sim	-----	Sim	-----	-----

Normalidade Implícita: se a distribuição Gaussiana é assumida	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
<i>Outliers</i> : se existe uma indicação de sua eliminação ou como tratá-los	Sim	Sim	Sim	----	Sim	Sim	----	-----
Erros sistemáticos: se há uma indicação de como lidar com eles	----	Sim	----	Sim	----	Sim	-----	-----
Se RMSE é proposto como medida de incerteza	----	----	Sim	----	Sim	----	Sim	-----
Se a média e o desvio padrão são medidos	----	Sim	----	Sim	----	Sim	Sim	
Planimetria: se a aplicação na componente horizontal é considerada	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Altimetria: se a aplicação na componente vertical é considerada	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
3D: se a aplicação para 3D é considerado	----	----	----	----	----	Sim	Sim	Sim
Se um deslocamento XY é possível para ajuste em Z	Sim	----	Sim	----	----	----	----	-----
Circular (C)/ Linear (L): se as componentes XY são analisadas juntas (C) ou independentes (L)	L	L	L	C	C	C	L	L
Categorias: Se há proposta de categorias para exatidão	----	----	Sim	Sim	----	Sim	Sim	-----
MDE: se há explícita consideração de aplicação do método para MDE	----	----	----	----	Sim	Sim	Sim	Sim
Expressão dos resultados: tipo de registro para indicar resultados (passa/falha =1; classificação =2; valor = 3)	1	1	2	3	3	3	3	3
Probabilidade do resultado	90%	~90%	~90%	90%	95%	90%	90%	90%

Fonte: modificado de Ariza; Atkinson (2008).

O erro padrão representa todos os erros cometidos no desenvolvimento de uma carta, desde a coleta de dados até a representação da informação. Com os avanços da informática, algumas etapas da produção de cartas foram automatizadas. Assim, os erros foram minimizados. Somando-se a isso, ocorreu a melhoria na resolução das imagens orbitais e aéreas, graças aos avanços tecnológicos dos sensores e aumento da capacidade de armazenamento de dados destes dispositivos. O padrão de exatidão cartográfica deve estar alinhado com os métodos atuais de produção cartográfica (ROCHA, 2002; PEREIRA; NERO, 2012).

4.10.1 Padrões para Exatidão do MDT

USGS (1998) trouxe uma abordagem sobre os tipos de erros nos dados de MDE, como identificá-los e, quando possível, como eliminá-los:

Erros grosseiros (*blunders*): é considerado grosseiro ou anômalo, o erro vertical que excede o erro permitido. Usualmente, 3 vezes o valor de sigma para cada nível de MDE são removidos antes da entrada na base de dados no MDE. Geralmente, são facilmente indentificáveis, mas sua ocorrência alerta para um conjunto de dados deteriorados. Erros grosseiros são causados por falha na leitura de curvas de nível, transposição numérica de valores e observações descuidadas. Sempre que detectados, estes erros devem ser eliminados;

Erros Sistemáticos: são erros que seguem algum padrão fixo ou regra, geralmente de magnitude constante ou sinal, introduzidos por métodos ou sistemas e tipicamente previsíveis. Estes tipos de erros causam viés ou artefatos no produto final. Para dados MDE, erros sistemáticos incluem offset de elevação vertical, seja para um quadrângulo ou para área e perfis individuais locais; feições fictícias, como topos fantasmas, cumes, bancos ou estrias e interpretação imprópria de superfícies do terreno devido a efeito de árvores, construções e sombras. Erros sistemáticos podem ser eliminados ou reduzidos substancialmente quando a causa é conhecida;

Erros Randômicos: Erros randômicos são os erros remanescentes após terem sido eliminados os erros grosseiros e sistemáticos. Resultam a partir da combinação de erros de causas desconhecidas e acidentais, que estão além do controle do observador.

A verificação da exatidão de modelos digitais do terreno (MDT) produzidos pela USGS emprega pelo menos 28 pontos, sendo no mínimo 20 pontos no interior e 8 pontos nas bordas do MDT, os quais são comparados com homólogos oriundos de uma fonte de maior exatidão e calculado o erro em cada ponto (e_z). Os testes baseiam-se em limites de erros máximos e erros médios quadráticos ($RMSE_z$), nos quais classificam o MDT de acordo com o nível de exatidão, como mostrado na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros de análise para classificação do MDT de acordo com USGS

Classificação do MDT	RMSE _z	Erro vertical da amostra na fonte de maior exatidão.
Nível 1	≤15 m	≤50 m
Nível 2	≤7 m	≤ 2x equidistância de curvas de nível
Nível 3	≤7 m	≤ equidistância de curvas de nível

Fonte: USGS, 1998.

Os pontos de teste devem ser bem distribuídos e serem representativos do terreno. Preferencialmente, podem ser usados pontos de controle de campo, pontos de teste da aerotriangulação, pontos notáveis de elevação ou pontos entre curvas de nível, extraídos de um mapa com equidistância apropriada para verificação da exatidão. Pontos de teste identificados em mapas sobre estruturas como rodovias, linhas férreas, passarelas e pontes podem ser usados com cautela, desde que não haja dúvidas sobre a elevação.

Atkinson (2005) comenta que as categorias de exatidão USGS para MDT se definem tanto em nível global, por meio do RMSE_z, como por meio de pontos isolados. Os testes de categorização do MDT são mais preciso em relação aos erros grosseiros, como parte de sua influência no RMSE, contribuem para determinar sua exatidão no BDG.

Para NDEP (2004), a exatidão vertical deve ser requerida em termos dos riscos à saúde e à segurança pública, se caso os dados digitais de elevação falharem. Há cinco principais aplicações da exatidão vertical: 1) Para navegação e segurança marinha; 2) Gerenciamento de inundações e alagamentos de terrenos planos; 3) Manejo de áreas úmidas e ecológicamente sensíveis; 4) Gestão de obras públicas em áreas densas onde grandes escalas horizontais são requeridas e 5) Para obras especiais de engenharia onde dados de elevação de maior precisão são requeridos.

A exatidão vertical dos modelos de elevação é função da resolução horizontal no caso de dados digitais, dado pelo GSD (*Ground Sample Distance*) que corresponde à distância entre dois pontos coletados no terreno. O GSD é função do sensor utilizado na coleta de dados e deve ser especificado para a menor dimensão do terreno a ser detectada.

Geralmente, a nuvem de pontos é recolhida à GSD maior que a resolução final do MDE. Assim, durante o processo de interpolação (mais comumente, o TIN) para geração do MDE, alguns pontos são eliminados, principalmente em superfícies com relevo mais brandos.

Além disso, a suavização do MDE produz um produto final com resolução diferente da malha de interpolação.

No caso da fotogrametria aérea, a exatidão vertical é influenciada pela altura do sol, distância focal da câmera e altura do voo, bem como pela verticalidade de coleta de imagens.

Os limiares de exatidão vertical são estabelecidos em função do $RMSE_z$ em função da escala horizontal e espaçamento das curvas de nível, semelhante ao recomendado por NMAS e NSSDA. Para NMAS, a tolerância do erro vertical a 90% de nível de confiança corresponde a 50% do espaçamento entre curvas de nível, enquanto que para NSSDA, a tolerância do erro vertical a 95% de nível de confiança é de 30% do espaçamento entre curvas de nível. Uma comparação entre NMAS e NSSDA é mostrada na Tabela 14.

Tabela 14 - Comparação entre NMAS e NSSDA para verificação da exatidão vertical

NMAS (Intervalo entre curvas de nível)	NMAS (Tolerância do Erro vertical 90% de nível de confiança)	NSSDA ($RMSE_z$)	NSSDA Exatidão a 95% de nível de confiança
0,3048	0,1524	0,0925	0,1820
0,6096	0,3048	0,1850	0,3630
1,2192	0,6096	0,3700	0,7260
1,5240	0,7620	0,4630	0,9080
3,0480	1,5240	0,9270	1,8016
6,0960	3,0480	1,8530	3,6320
12,1920	6,0960	3,7060	7,2640
24,3840	12,1920	7,4120	14,5280

Fonte: NDEP, 2004.

A magnitude da exatidão (z) varia para diferentes coberturas do solo. Assim, para NDEP (2004), a exatidão vertical do conjunto de dados verticais deve ser verificada para a finalidade de aplicação do MDE, dividida em duas categorias: fundamental para terrenos abertos e suplementar para outros tipos de cobertura, como por exemplo, áreas de florestas e gramíneas altas como as de cana de açúcar. No caso, de exatidão suplementar, o relatório de verificação da exatidão vertical deverá vir acompanhado da descrição da cobertura do solo.

NDEP (2004) não exige que seja realizada a verificação da exatidão horizontal no MDE, porque esta é presumida em dados de elevação acurados, uma vez que erros horizontais contribuem significativamente para erros verticais grosseiros e, assim, são facilmente detectados. Além disso, feições necessárias para realizar testes de exatidão horizontal são melhor identificadas em produtos planos e com maior resolução. Mas, recomenda que a

exatidão horizontal esperada seja apresentada juntamente com o relatório de verificação da exatidão vertical, observando-se os padrões NMAS e NSSDA, como mostrado na Tabela 15.

Tabela 15 - Comparação entre exatidão horizontal NMAS e NSSDA em função da escala do mapa

NMAS (escala do mapa)	NMAS (Tolerância do Erro vertical a 90% de nível de confiança, CMAS, em m)	NSSDA (RMSE _r) (m)	NSSDA Exatidão _z a 95% de nível de confiança
1:1.200	1,015	0,670	1,159
1:2.400	2,033	1,339	2,318
1:4.800	4,063	2,678	4,635
1:6.000	5,081	3,348	5,794
1:12.000	10,159	6,695	11,588
1:24.000	12,192	8,035	13,906

Fonte: NDEP, 2004.

Quanto a avaliação da exatidão do MDT, NDEP (2004) segue as recomendações de NSSDA, em que a exatidão horizontal e vertical deve ter um nível de 95% de confiança comparada a uma fonte com precisão superior a 3 vezes ao conjunto de dados que está sendo testado.

Em locais de terrenos muito acidentados ou remotos, onde a exatidão horizontal dificilmente pode ser verificada, este padrão recomenda aos produtores mais cautela no momento de apresentar a validação para verificação conjunta dos dados horizontais e verticais.

Outra questão que é ressaltada, refere-se a distribuição gaussiana dos dados, mais facilmente conseguida para dados horizontais. Os dados verticais, principalmente os extraídos em florestas densas, não apresentam comportamento normal. Assim, NDEP recomenda à NSSDA e FGDC, modificações nos testes para dados não normais.

A NDEP considera importantes três fatores na avaliação da exatidão do MDT:

Continuidade da Coleta e Processamento dos dados: um projeto de mapeamento pode ser realizado a partir de um único sistema de coleta e processamento de dados. Mas, muitas vezes, numa mesma área são sobrepostos dados de diversos procedimentos, tanto de coleta como de processamento de dados. Assim, a cada mudança deve acarretar uma variação na exatidão dos dados e, por este motivo, essas variações devem ser testadas separadamente;

Variação topográfica: a variação no relevo (montanhas, rampas e superfícies planas)

pode afetar a exatidão do modelo de elevação de formas diferentes. Também, de acordo com a aplicação, a exatidão requerida para relevo de maiores alturas pode ser menos exigente que para terrenos planos. Assim, para diferentes tipos de relevo pode-se especificar testes distintos com níveis de exatidão diferentes;

Variação na cobertura do solo: diferentes tipos de cobertura do solo podem afetar a exatidão do modelo de elevação. Florestas altas e densas, assim como gramíneas altas, tendem a causar maiores erros que em terrenos desobstruídos, como os com cobertura de gramíneas rasteiras ou solo exposto. Diante disso, NDEP recomenda que testes sejam conduzidos de forma independente para terrenos obstruídos e não obstruídos, e para aquelas categorias que consistem numa importante porção do projeto do usuário.

Os pontos de checagem devem ser mais adensados na vizinhança de feições de maior interesse e mais esparsos em locais de menor interesse. Quando a distribuição do erro é não aleatória, é desejável considerar a localização dos pontos para corresponder ao erro de distribuição. NDEP considera a distribuição proposta por NSSDA, ou seja, para áreas retangulares pressupõe-se que a exatidão horizontal é uniforme. Assim, divide-se essa área em quatro quadrantes e loca-se pontos espaçados entre si de 10% da diagonal, de modo que haja pelo menos 20% dos pontos em cada quadrante. Isso garante que a exatidão do MDE tenha um nível de 95% de confiança, ou seja, que a cada 20 pontos (mínimo recomendado pela NSSDA) testados, apenas um apresente exatidão inferior a apurada.

NDEP recomenda pelo menos 20 pontos (30 seria desejável) por categoria de uso do solo. Assim, se houver cinco categorias de uso do solo, serão requeridos pelo menos 100 pontos. Isso é importante para detectar erros sistemáticos.

4.10.2 Padrão de Exatidão Cartográfica Brasileiro

Para produtos analógicos, o produto cartográfico deve ter sua exatidão posicional avaliada em função do erro de graficismo e sua escala, com pelo menos 20 pontos testados (MERCHANT, 1982). O erro padrão (EP) considerado na avaliação da exatidão planimétrica pode ser o desvio padrão ou RMSE das discrepâncias verificadas entre as coordenadas dos pontos amostrados no produto cartográfico e extraídas de uma fonte, pelo menos 2,5 mais precisa. Enquanto que para a avaliação da altimetria, é considerada uma proporção do espaçamento entre as curvas de nível. Em função do erro de graficismo considerado para a

escala e da proporção para a equidistância vertical (EV), o produto cartográfico pode ser classificado em 3 classes: A, B ou C (Tabela 16).

Tabela 16 - Classificação das cartas quanto à exatidão, ao PEC e EP planimétrico e altimétrico

Classe	PEC Planimétrico	EP planimétrico	PEC Altimétrico	EP altimétrico
A	0,5 mm x escala	0,3 mm x escala	1/2 Equid. CN ¹	1/3 Equid. CN
B	0,8 mm x escala	0,5 mm x escala	3/5 Equid. CN	2/5 Equid. CN
C	1,0 mm x escala	0,6 mm x escala	¾ Equid. CN	3/8 Equid. CN

¹ Equid. CN – Equidistância entre curvas de nível.

O PEC planimétrico considera que 90% dos pontos testados se enquadram na classe pretendida, ou seja, 1,64 x EP. De acordo com a RN 501/2012, a escala mínima para apresentação de documentos cartográficos é 1:10.000, classe B. Assim, o PEC planimétrico admite erro máximo de 80 cm nas coordenadas X e Y. Considerando um espaçamento vertical entre curvas de nível igual a 5,0 m, o PEC altimétrico admite desvio padrão máximo entre curvas de nível igual a 2,0 metros. Para produtos digitais, adota-se a classificação apresentada nas Tabelas 17, 18 e 19.

Tabela 17 - Padrão de exatidão cartográfica planimétrico de produtos cartográficos digitais

Escala	1:1000		1:2000		1:5.000		1:10.000	
Classe	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	0,28 m	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70
B	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00
C	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00
D	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00

Tabela 18 - Padrão de exatidão cartográfica do MDT, MDE, MDS de produtos cartográficos digitais

Classe	1:1000 (EV = 1,00 m)		1:2000 (EV = 1,00 m)		1:5.000 (EV = 2,00 m)		1:10.000 (EV = 5,00 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
B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66	2,50	1,67
C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00
D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50

Tabela 19 - Padrão de exatidão cartográfica da altimetria de Produtos cartográficos digitais

Classe	1:1000		1:2000		1:5.000		1:10.000	
	(EV = 1,00 m)		(EV = 1,00 m)		(EV = 2,00 m)		(EV = 5,00 m)	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66	2,50	1,67
B	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00
C	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50
D	1,00	0,60	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00

O PEC-PCD parte do pressuposto da normalidade dos dados (BRASIL, 1984). Assim, testes de inferência, com base na média e variância, são aplicados para verificar a tendência e o enquadramento no padrão de exatidão posicional. Este padrão, assim como outros, não apresenta solução para os casos em que a amostra testada não apresente distribuição normal. Então, propõe-se que a análise de exatidão seja feita pelo método não paramétrico (U) de Mann-Whitney, descrito no item 4.9.

5. ÁREAS DE ESTUDO

A parte experimental do trabalho de pesquisa foi aplicada em dois estudos de caso: um sendo no trecho da área seca do reservatório da UHE Álvaro de Souza, Bariri, SP, e outro, no lago de contenção de enchentes, localizado no Campus da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), com sede no município de São Leopoldo, RS.

5.1 UHE Álvaro de Souza Lima

A UHE está localizada no km 12 da rodovia que liga os municípios de Bariri a Boracéia. É o segundo barramento do rio Tietê, entre o de Barra Bonita e Ibitinga (Figura 19). A área total inundada é de 63 km² e o volume útil de 607 x 10⁶ m³. O gerador tipo Umbrella Vertical possui potência total de 136,8 MW. A cota útil nominal de 427,50 e mínima, de 426,50. A altura de queda bruta é de 24,00 metros.

Figura 19 - Localização da área de estudo próxima à barragem de Bariri no Rio Tietê, Estado de São Paulo

A área selecionada para avaliação da exatidão posicional consistiu no terreno onde está instalada a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), da Marinha do Brasil. No entanto, esta propriedade é de direito real da AES, de São Paulo. A escolha deste local foi motivada pelos seguintes requisitos: permissão formal dos órgãos, facilidade de acesso, proximidade com marcos de referência para realização dos levantamentos topográficos e

heterogeneidade na ocupação do solo, com áreas de vegetação e algumas construções. O terreno tem uma área de 70.000 m², aproximadamente, e tem como principal acesso a Rodovia SP-261 que liga Bariri a Boracéia.

5.2 Lago UNISINOS

O segundo estudo de caso foi desenvolvido no Campus da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), em São Leopoldo, no Rio Grande do Sul. O voo foi realizado sobre o lago artificial, o qual tem aproximadamente 25 mil metros quadrados (Figura 20).

Figura 20 - Localização do lago de contenção de águas pluviais da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS, RS

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente foi realizada pesquisa bibliográfica nas principais bases de dados com as seguintes palavras chave: “UAV + accuracy”; “UAV + standart deviation”; “UAV + photogrametry”; “Standart to digital cartography” e seus anacrônicos nas seguintes bases de dados Scopus, Francis & Taylor, Elsevier, Mdpi, Scielo.

As etapas de trabalho da atividade experimental consistiram na coleta de imagens com sensor embarcado em RPAS, no planejamento e coleta de pontos de controle, no processamento de imagens e na análise da exatidão posicional (Figura 21).

Figura 21 - Fluxograma de atividades de pesquisa para análise de exatidão posicional de produtos da fotogrametria através de RPAS

6.1 Aquisição de Imagens

As imagens utilizadas no estudo da UHE Álvaro de Souza Lima foram cedidas pela XMobots Aeroespacial e Defesa, uma empresa fabricante de RPAS, localizada no município de São Carlos, SP.

O voo foi realizado em 02 de abril de 2015 numa faixa do reservatório da UHE compreendida entre as coordenadas UTM 22S: 730000 m E, 7546000 m N e 737000 m E a 7551000 m N, no sistema de referência SIRGAS 2000, perfazendo uma área de aproximadamente 2,439 Km² englobando uma porção à montante e à jusante da barragem.

As linhas de voo foram definidas em função do perímetro da faixa a ser recoberta, da altura de voo e dos parâmetros geométricos da câmera. Para este estudo, foram planejados recobrimentos de 80% longitudinal e 60% lateral, empregando-se o software XPlanner da XMobots.

O RPAS Echar 20B utilizado é do tipo asa fixa com 2,135 m de envergadura, 0,945 m de altura e 0,426 m de altura, dotado de GPS de posicionamento absoluto (navegação,

precisão de 10 m) e IMU – *Inertial Movement Unit*. A aeronave foi lançada por meio de catapulta e o controle de navegação efetuado por terminal de dados de solo, GDT-S5A, com alcance de comunicação LOS de 5 a 10 km (Figura 22).

Figura 22 - RPAS de asa fixa, Echar 20B, terminal de comunicação de dados de solo e câmera Canon EOS 600D

Fonte: XMobots, 2015.

As imagens foram capturadas com câmera CANON EOS 600D RGB, de 36 MPixel, 12GB, distância focal de 28 mm, f/7,1, tempo de exposição 1/2000 s. A altitude do voo variou entre 300 a 380 metros do solo. Foram coletadas 1100 imagens em 1 hora e 14 minutos de voo, ou seja, das 10h08min às 11h22min. Em função da distância focal da câmera (f) e da altura média do voo (a), pode-se estimar a escala de voo pela Eq. 52.

$$E^{-1} = f \cdot a^{-1} \quad (52)$$

Assim, a escala de voo foi de aproximadamente 1:12.142. Com esse resultado, as dimensões do sensor (22,987 x 15,325 mm) e o tamanho da imagem em pixel (5187 x 3456), determinou-se o tamanho do pixel pelas Eq. 53 e 54.

$$x_{pixel} = x_{sensor} \cdot x_{imagem} \quad (53)$$

$$y_{pixel} = y_{sensor} \cdot y_{imagem} \quad (54)$$

O tamanho do pixel foi de 0,0044 m em x e y. Desta forma, calculou-se o GSD das imagens pela Eq. 55.

$$\text{denominador da escala} = \text{GSD} \cdot x_{\text{pixel}}^{-1} \quad (55)$$

Que resultou num GSD de 5,34 cm em média.

No lago da UNISINOS, as imagens foram coletadas, simultaneamente, com câmera CANON ELPH 110HS de 16 MP e com sensor multiespectral Parrot Sequoia. Ambos foram embarcados no RPAS hexarotores ST800 (Figura 23). As principais características dos sensores e das imagens, bem como, a altitude de voo são apresentadas na Tabela 20.

Figura 23 - RPAS ST800 com câmeras (a) Canon ELPH 110 HS e sensor Parrot Sequóia. (b) Detalhe do sensor Parrot Sequóia

Fonte: Vizlab, 2017.

Tabela 20 - Características básicas da câmera RGB CANON ELPH 110HS e do sensor Parrot Sequóia, do voo e das imagens coletadas

Câmera/ Sensor	Resolução	Distância focal (mm)	Dimensões do sensor	Tamanho da imagem no pixel (mm)	Altura média do voo (m)	Tamanho do pixel (cm)	GSD (cm)
RGB CANON ELPH 110HS	16,1 MP	4,4	6,17 x 4,63	-----	120,00	5,00 cm	15,00
Parrot Sequoia 4.0 (Red)	16 MP	-----	-----	1280 x 960	120,00	14,52	14,52

Foram coletadas 83 imagens com câmera Canon 16,1 MP RGB e com sensor Sequóia nas bandas RGB e NIR. A altura média do voo foi de 120 metros, em relação ao nível do solo. Assim, em função da distância focal da câmera (f) e da altura média do voo (a), a escala de voo foi de 1:28.000 para as imagens coletadas com a câmera Canon. O GSD final de ambos os sensores foi de 15,00 cm para o ortomosaico gerado com as imagens da Canon após reamostragem e 14,52 cm para o gerado com imagens do sensor Sequóia.

6.2 Determinação de Pontos de Controle

Os pontos de controle foram levantados no campo posteriormente ao vôo por meio de levantamento GNSS e trigonométrico. Foi estabelecida a precisão mínima de 3 vezes à precisão do produto cartográfico em análise, como recomendado por Atkinson (2005), Domingo (2000) e PEC-PCD (2011).

Os referenciais tridimensionais adotados foram os marcos MB001, RN 001 e BA-74 da UHE Álvaro de Souza Lima e suas posições foram determinadas por posicionamento estático do receptor GNSS RTK Leica Viva GS-15 durante 4 horas de observação em dois dias consecutivos e horários distintos, a fim de eliminar erros de ambiguidade e em acordo com Monico (1998). As coordenadas UTM 22S, no SIRGAS 2000, foram processadas no LGO (*Leica Geosystem Office*) e suas posições precisas foram estabelecidas pelo serviço de Posicionamento por Ponto Preciso do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, PPP do IBGE.

Foram coletados 38 pontos de controle com o GNSS diferencial RTK Leica Viva GS-15, no modo rápido estático, tendo como parâmetro a fixação da exatidão em E e N maior ou igual a 0,005 m e para a altitude geométrica (h) maior que 0,007 m. Também, foi adotado a projeção UTM 22 S e o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS, 2000). Desses pontos, 15 foram utilizados para georreferenciar a nuvem de pontos densa durante o processamento SfM e 23 para avaliação da exatidão posicional.

Também foi realizado o levantamento topográfico trigonométrico com estação total Leica TCR 400, com precisão nominal de $7 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$, amarrados a uma poligonal aberta enquadrada formada pelos vértices RN001, BA – 74 e MB001, os mesmos usados como referenciais tridimensionais do levantamento GNSS. A coleta de dados seguiu as recomendações da NBR 13.133/1994, que resultou em 170 pontos.

Após o processamento do levantamento planialtimétrico, os pontos foram importados para o QGis 2.8.3 Wien e o MDT do terreno foi gerado com gride de 1 metro com interpolador TIN. Esse MDT foi adotado como MDT de controle para avaliação da exatidão do MDT_{RPAS}.

Os pontos de controle foram identificados na sinalização horizontal da via no entorno do lago, quinas de meio fio e cantos de caixas de passagem. Foram levantados no campo, posteriormente ao voo, com GNSS Diferencial RTK, tendo como parâmetro a fixação da exatidão em E e N maior ou igual a 0,02 m e em h maior que 0,10 m.

O referencial tridimensional adotado como base foi o marco B-0017, com coordenadas UTM 22 S (484787,261 m E e 6703640,568 m N), no SIRGAS 2000 e altitude ortométrica igual a 44,866 m, com referência no marégrafo de Imbituba. SC. Foram coletados 38 pontos de controle, sendo que, 7 foram utilizados para georreferenciar a nuvem de pontos densa durante o processamento digital de imagens (Figura 24) e 31 pontos para avaliação da exatidão posicional.

Figura 24 - Localização dos pontos de apoio para georreferenciamento da nuvem de pontos do lago UNISINOS

Fonte: Vizlab, 2017.

Resumo das características dos pontos de controle utilizados nos produtos cartográficos da UHE Álvaro de Souza Lima e lago UNISINOS é apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 - Características dos pontos de controle utilizados nos produtos cartográficos da UHE Álvaro de Souza Lima e lago Unisinos

UHE Álvaro de Souza Lima, Bariri - SP		Lago Unisinos, São Leopoldo, RS
Referenciais 3D	3	1
Sistema de Referência	SIRGAS 2000	SIRGAS 2000
Pontos de apoio	15	7
Pontos de checagem	23	31
Método de coleta	GNSS RTK	GNSS RTK
σ (E/N)	< 5 mm	< 2 cm
σ (h)	< 7 mm	< 10 cm
Lev. topográfico	Leica RT 400	-----
σ	7mm + 1ppm	-----
Núm. de pontos	170	-----

6.3 Processamento de Imagens

O processamento das imagens foi realizado no Laboratório de Visualização Avançada e Geoinformática (VizLab) da Universidade do Vale dos Sinos (UNISINOS), em São Leopoldo, RS. Foi utilizado o software APS, do Menci Software, para aplicação cartográfica com imagens adquiridas através de RPAS.

A área selecionada para análise da exatidão foi coberta com 73 imagens (Figura 25). Estas imagens foram importadas para o APS juntamente com o *log* de voo contendo a identificação da imagem, posição e RGB do pixel central e atitude do voo (*yaw*, *pitch*, *roll*),

fornechos pela IMU. Também foram importados 15 pontos de apoio levantados com GNSS Diferencial RTK, os quais foram identificados manualmente nas fotos. O processamento seguiu o fluxo de trabalho apresentado no item 3.5.4, demorou aproximadamente 2 horas e envolveu 36.899.610 pontos 3D. Foram gerados os seguintes produtos: MDE, MDT e ortomosaico.

Figura 25 - Cobertura da área amostral por 73 imagens, posição da câmera em cada imagen e o número de sobreposições de imagens

O processamento das imagens foi realizado no Laboratório de Visualização Avançada e Geoinformática (VizLab), da Universidade do Vale dos Sinos (UNISINOS), em São Leopoldo, RS. Foi utilizado o software PIX4D Pro para aplicação cartográfica com imagens adquiridas com RPAS.

As imagens foram importadas para o software Pix4Dmapper Pro, version 3.1.23, juntamente com o *log* de voo contendo a identificação da imagem, a posição e RGB do pixel central e atitude do voo (*yaw*, *pitch*, *roll*) fornecidos pela IMU. Os pontos de apoio levantados com GNSS Diferencial RTK foram identificados manualmente nas fotos. O processamento seguiu o fluxo de trabalho apresentado no item 3.4 e foram gerados os seguintes produtos: ortomosaico e MDT.

6.4 Análise da Exatidão Posicional

A verificação da exatidão horizontal e vertical foi realizada de modo independente,

como sugerido por Arisa e Atkinson (2008). Nos estudos de caso que serão apresentados a seguir, a análise da exatidão posicional foi efetuada pela comparação entre pontos identificados no ortomosaico e MDT e seus homólogos foram levantados no campo com GNSS Diferencial RTK.

No estudo de caso da UHE Álvaro de Souza Lima, além do método de análise por pontos, foi realizada a comparação entre o MDT_{RPAS} e o $MDT_{controle}$, originado a partir do levantamento planialtimétrico da área amostral com estação total Leica TCR 400. Foram aplicadas uma malha regular e outra irregular para extração de pontos virtuais sobre ambos MDTs. A comparação entre MDTs é sugerida pela USGS (1998). Porém, como esse método avalia somente a componente vertical (h), a exatidão horizontal deve ser verificada por outro método ou presumida como de maior precisão.

A seguir, é apresentado o fluxograma de trabalho para verificação da exatidão posicional por meio de pontos homólogos, adaptado das propostas de Santos (2015) e Atkinson (2005), (Figura 26).

Figura 26 - Fluxograma para análise da exatidão posicional a partir de pontos homólogos

A análise de exatidão por comparação entre o MDT_{RPAS} e o $MDT_{controle}$ visa avaliar um método com base em pontos virtuais que não necessariamente são homólogos. Fundamentado

no fato de que discrepâncias verticais são correlacionadas com discrepâncias horizontais (USGS, 1994), ou seja, uma grande discrepância na elevação subentende-se que há um grande desvio horizontal naquele ponto. O fluxograma para análise da exatidão do MDT por meio de MDT de controle é mostrado na Figura 27.

O MDT_{controle} foi gerado com os pontos coletados no levantamento trigonométrico, os quais foram mais adensados na área com vegetação e menos adensados em áreas abertas. Uma vez que o MDT de teste contém altitudes geométricas, foi adotada a altitude geométrica, referida ao marco BA-74, para determinação das altitudes dos pontos. O interpolador TIN, com gride de 1,0 x 1,0 m foi usado para interpolação das elevações do MDT controle no software Quantum GIS 2.8.3 Wien.

Figura 27 - Fluxograma para análise da exatidão do MDT_{RPAS} por meio de comparação com MDT_{controle}

Como a exatidão deve ser verificada por fonte mais precisa, o MDT_{RPAS} foi degradado para um pixel de 2,5 x 2,5 metros, com uma relação 2,5:1. Em seguida, no QGIS 2.8.3 Wien, os dois MDTs foram sobrepostos. Com a ferramenta *sample points* foram extraídas 105 elevações de uma malha regular de espaçamento de 30 x 30 m.

Além da amostragem por malha regular, também foi realizada uma amostragem aleatória de 100 pontos e 100 iterações no arcGIS 10.1. Uma rotina foi elaborada no arcPy (Phyton do arcGis) para esse fim. As elevações desses pontos foram exportadas para planilha eletrônica e os testes prévios e de exatidão foram aplicados. De posse dos pontos, seguiram-se as etapas apresentadas no item 5.3. A Figura 29 apresenta o fluxograma de avaliação da exatidão do MDT_{RPAS} comparado ao MDT_{controle}.

As discrepâncias ou erro (e_i), entre as coordenadas “C_{RPAS}” de feições identificadas no ortomosaico e MDT com as coordenadas de controle “C_{controle}” das mesmas feições, obtidas por método mais preciso, foram calculadas pela Eq. 56.

$$e_i = C_{RPAS} - C_{controle} \quad (56)$$

Após o cálculo das discrepâncias, como recomendado por Domingo (2000), realizou-se a inspeção dos pontos atípicos ou *outliers*. Esses pontos não necessariamente são erros grosseiros, mas devem ser investigados. Para identificar um *outlier*, primeiramente estimou-se o erro esperado (σ_{priori}), com base nas etapas de aquisição de dados e processamento das imagens.

A variância a priori para o produto cartográfico deve considerar todos os erros cometidos durante as diversas fases do processo de aquisição e processamento de dados, a fim de obter a geração do ortomosaico. No processo de aquisição, erros são introduzidos pela precisão do GNSS embarcado, pelas condições de voo e pelas características da câmera. No processamento dos dados, os principais erros são referidos à precisão das coordenadas dos pontos de apoio relativa ao método de coleta, à precisão na reconstrução da imagem em função da qualidade das imagens, à sobreposição e performance do software de processamento e, por último, à precisão dos pontos de checagem técnica utilizados para checagem, por exemplo, extração de coordenadas manual ou automatizada. Assim, para estimar o erro esperado, σ_{priori} , dos produtos cartográficos digitais oriundos de imagens coletadas com RPAS foi elaborada a Eq. 57.

$$\sigma_{priori} = \left(\sigma_{GNSS-RPAS}^2 + \sigma_{sensor}^2 + \sigma_{apoio}^2 + \sigma_{apoio-imagem}^2 + \sigma_{proc}^2 + \sigma_{MDE}^2 + \sigma_{checagem}^2 \right)^{0,5} \quad (57)$$

Em que:

$\sigma_{GNSS\ RPAS}^2$: Erro médio do posicionamento das imagens em função da tecnologia do receptor GNSS embarcado, o qual será considerado apenas para modelos georreferenciados diretamente;

σ_{sensor}^2 : Erro de calibração da câmera, dado pela diferença entre as coordenadas do centro da imagem inicial e a otimizada da câmera;

σ_{apoio}^2 : erro de posição dos pontos de controle coletados em campo, extraído do relatório de pós-processamento, onde:

$$\sigma_{apoio\ 2D}^2 = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^{0,5} \quad \text{para análise da exatidão horizontal;}$$

$$\sigma_{apoio\ 3D}^2 = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)^{0,5} \quad \text{para análise da exatidão do modelo digital do terreno;}$$

σ_{proc}^2 : erro na identificação de pontos homólogos, geralmente ocasionado por falhas na sobreposição das imagens e, ainda, pelo desempenho do software. Este erro pode ser minimizado selecionando imagens de melhor qualidade ou com o uso de filtros. No último caso, deve-se considerar a eficiência dos métodos de filtragem de pontos anômalos ou indesejáveis;

$\sigma_{apoio\ imagem}^2$: erro de identificação dos pontos de apoio na imagem, função das características dos alvos;

σ_{MDE}^2 : erro de interpolação devido a falha de filtros na discretização de camadas da nuvem de pontos densa. Este erro influencia mais fortemente a componente Z, pois ao não separar pontos do terreno de outras feições, como árvores e edificações, o modelo filtrado do Modelo Digital de Superfície (MDS) pouco se diferencia do MDT;

$\sigma_{checagem}^2$: erro de identificação dos pontos de checagem no ortomosaico, função da resolução

espacial final, do formato dos elementos de checagem, se alvos artificiais ou estruturas existentes. Semelhante ao $\sigma_{apoio\ imagem}^2$, neste estudo foi adotado 3 vezes a resolução espacial do ortomosaico.

Para o cálculo do erro esperado, as componentes foram extraídas dos relatórios de processamento GNSS e SfM foram convertidas em distância amostrada no solo ou GSD (Ground Sample Distance). Em seguida, σ_{priori} foi multiplicado por um fator k (2,5 a 3,0) para inspecionar *outliers*. O resultado obtido foi comparado com as discrepâncias absolutas em cada ponto. Os valores que superaram o parâmetro foram excluídos da análise estatística de exatidão. Então, fez-se a verificação se o número de pontos excluídos era inferior a 20% do total da amostra. Como relatado por Hampel (1985), é comum detectar entre 10 e 20% de erros grosseiros.

Quanto a análise de independência da amostra, foi construído o semivariograma para discrepâncias (EN e h) em função das posições GNSS, Eq. 18, com os parâmetros apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Parâmetros para análise geoestatística quanto à independência das discrepâncias EN e h

Localização	Discrepância	Direções (graus)	R (graus)	Comprimento Lag (m)	Dist. Corte (m)
UHE - Bariri	EN e h	0°, -45°, 45°, 60° e 90°	10	30	1000
Lago Unisinos	EN e h	0°, -45°, 45°, 30° e 90°	10	30	1000

Como relatado por Santos (2015), se o variograma não apresentar os elementos principais como contribuição, alcance e patamar, decide-se pela independência dos dados. Caso contrário, deve-se modelar o semivariograma e aplicar o mesmo teste sobre os resíduos padrão, considerando correlação entre discrepâncias estimadas e extraídas do modelo maior que 0,6.

Para checar a normalidade da amostra foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk foi selecionado para o teste de normalidade dos erros, porque este teste apresentou o melhor

desempenho na avaliação de dados de distribuição livre quando comparado com Kolmogorov-Smirnov, Qui quadrado e teste t (TORMAN; COSTER; RIBOLDI, 2012).

No teste de Shapiro-Wilk, são realizadas as seguintes etapas:

- 1) Formula-se a hipótese de que os dados amostrais provêm de uma distribuição normal, sendo:

$$H_0 = \text{amostra provém de uma população Normal}$$

$$H_1 = \text{amostra não provém de uma distribuição Normal}$$

- 2) Estabelece-se o nível de significância, geralmente, $\alpha = 0,05$;
- 3) Calcula-se a estatística de teste, o ordenamento dos valores amostrais, cálculo de b e cálculo de W ;
- 4) Toma-se uma decisão. Rejeita-se H_0 se $W_{\text{calc}} > W_{\text{tab}}$, ao nível de significância α ;
- 5) A decisão também pode ser baseada no p-valor, que representa um índice de força para a natureza que está sendo testada, com base em valores mais extremos que a estatística de amostra de teste. Sempre que o nível de significância for maior que o p-valor, pode-se rejeitar a hipótese nula.

Se confirmada a hipótese prévia de que as discrepâncias cumprem uma distribuição normal, a exatidão horizontal, vertical e do MDT pode ser verificada por meio da média, desvio padrão ou RMSE. Por outro lado, se confirmada a independência dos dados e é desconhecida a função de distribuição populacional ou se é sabida como não normal, pode-se aplicar o Teorema do Limite Central (TLC) (Wood et al., 1974). No TLC, a distribuição das médias tende a uma distribuição normal, com a mesma média de dados e com a variância dividida pela quantidade de dados. Como descrito por Santos (2015), primeiro agrupa-se as discrepâncias em 3 ou 4 dados, com no mínimo 30 agrupamentos. Depois, tira-se a média de cada agrupamento, constrói-se o novo histograma e calcula-se a variância.

Para a análise de aleatoriedade das discrepâncias foi aplicado o Teste de Sequências como apresentado no item 4.5.3., a hipótese nula pressupõe que as discrepâncias são

aleatoriamente distribuídas e a hipótese alternativa a contrária. Para realização do teste, determina-se a mediana e as hipóteses prévias foram elaboradas da seguinte forma:

$$H_0 : \textit{discrep\^ancia} \geq \textit{mediana}$$

$$H_1 : \textit{discrep\^ancia} < \textit{mediana}$$

Se verificada a independência, normalidade e aleatoriedade dos dados parte-se para a análise da exatidão dos produtos cartográficos por meio do teste t de Student e estatística circular para verificação de tendência horizontal, vertical e do MDT (itens 4.7.1 e 4.7.2) e qui-quadrado para teste das variâncias das discrepâncias comparadas a um padrão de exatidão de referência, neste caso foi usado o PEC-PCD.

Nos casos em que a normalidade não foi constatada, a exatidão dos produtos cartográficos foi verificada por meio da estatística circular para análise de tendência (item xx.xx) e teste U de Mann – Whitney (item 4.9) para comparação de semelhança com dados determinados por GNSS. E, o teorema de Chebyshev foi usado para estimar a precisão dos produtos cartográficos para pelo menos 90% de nível de confiança.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Produtos cartográficos digitais

Nas Figuras 28 a 33, são apresentados os ortomosaicos e MDTs das áreas de estudo da UHE Álvaro de Souza Lima e do lago da UNISINOS, com os respectivos pontos de apoio e checagem. E, na Tabelas 23, são apresentados os resultados do processamento SfM dos referidos produtos. A média, o desvio padrão e o RMSE foram calculados pelas discrepâncias entre os pontos de apoio identificados manualmente nos produtos e determinados por GNSS. Observou-se que as discrepâncias nas coordenadas E, N e h não possuem uma relação direta com o número de imagens em que os pontos foram marcados manualmente e verificados durante o processamento.

Tabela 23 – Desvios padrão e RMSE verificados automaticamente nas posições dos pontos de apoio e detectados no ortomosaico e MDT dos sensores Canon 600D, Canon ELPH 110S e Sequóia processados pela técnica SfM

Produto	Num de pontos de apoio	Desvio padrão 3D da determinação GNSS (m)	Desvio padrão (m)			RMSE (m)		
			E (m)	N (m)	h (m)	E (m)	N (m)	h (m)
Canon 600 D + SfM	15	0,02	0,13	0,21	0,41	0,13	0,21	0,42
Canon ELPH 110 S + SfM	8	0,02	0,23	0,30	0,31	0,29	0,29	0,32
Sequóia + SfM	8	0,02	0,12	0,10	0,17	0,12	0,10	0,17

O desvio padrão e o RMSE das discrepâncias entre as coordenadas dos pontos de apoio marcados na imagem e as obtidas com GNSS foram de 0,13 m em E, 0,21 m em N e 0,42 m em h, equivalente a 2, 4 e 7 GSD respectivamente para os produtos da Canon 600 D +

SfM gerados na UHE Álvaro de Souza Lima. Para os produtos do lago da UNISINOS, foram de 0,23 m em E, 0,30 m em N e 0,31 metros em h para os produtos gerados com Canon ELPH 110 S e 0,12 m em E, 0,10 m em N e 0,17 m em h para os produtos oriundos do sensor Sequóia mais SfM, correspondendo a aproximadamente 2 GSD para o primeiro e 1 GSD para o segundo sensor. Esses valores representam a precisão, obtida durante a transformação de Helmert, dos pontos de apoio identificados na imagem. Não devem ser generalizados para descrever a exatidão do produto gerado.

Figura 28- Ortomosaico da área de estudo da UHE Álvaro de Souza Lima e 23 pontos de checagem

Figura 29 - Modelo digital do terreno da área de estudo da UHE Àlvaro de Souza Lima

Figura 30 - Ortomosaico do lago da UNISINOS gerado a partir de imagens coletadas com câmera Canon ELPH 110HS. O ortomosaico foi coletado na banda falso NIR

Figura 31 - MDT do lago da UNISINOS gerado a partir de imagens coletadas com câmara Canon ELPH 110 S

Figura 32 – Ortomosaico do lago da UNISINOS gerado a partir de imagens coletadas nas bandas Green, Red e NIR do sensor Sequóia

Figura 33 - MDT do lago da UNISINOS gerado a partir de imagens coletadas nas bandas Green, Red e NIR do sensor Sequoia

7.2 Variância a Priori, Discrepâncias e Inspeção de *Outliers* dos Produtos Cartográficos Digitais

A análise da exatidão posicional foi realizada sobre o ortomosaico e MDT gerados a partir das imagens coletadas através dos sensores RGB da câmera Canon EOS 600D (UHE Álvaro de Souza Lima) Canon ELPH 110S e Parrot Sequóia (Lago UNISINOS) processadas pelo método SfM. Assim, a partir de agora, os resultados serão referidos aos pontos amostrados nos produtos de cada sensor +SfM.

A posição EN foi analisada de forma conjunta, assim foram obtidas as discrepâncias circulares, e h em separado para os pontos de checagem. Santos (2015) comenta que a análise conjunta da discrepância horizontal (EN) facilita a verificação da hipótese prévia de normalidade. Além disso, a análise de correlação das discrepâncias da altitude são mais consistentes com a posição EN do que com E e N, separadamente.

A variância estimada a priori com base nos eventos realizados durante a coleta e o processamento de dados, foi calculado pela Eq. 57 e as suas componentes são apresentadas na Tabela 24:

Tabela 24 - Componentes da variância a priori para inspeção de outliers dos produtos cartográficos digitais oriundo de imagens dos sensores Canon 600 D, Canon ELPH 110 S e Sequóia

Sensor	σ_{GNSS}^{RPAS} (m)	σ_{sensor} (m)	$\sigma_{control}$ (m)	$\sigma_{process}$ (m)	$\sigma_{apoio\ imagem}$ (m)	σ_{MDE} (m)	$\sigma_{checagem}$ (m)	σ_{priori} orto/ MDT (m)
Canon 600 D	0,000	0,001	0,240	0,300	0,420	0,420	0,180	1,68/1,68
CANON ELPH 110 S	0,000	0,000	0,049	0,553	0,235	1,050	0,450	0,73/1,28
Sequoia	0,000	0,028	0,030	0,230	0,235	1,050	0,450	0,56/0,42

Desta maneira, o erro horizontal a priori e do MDT para os produtos digitais oriundos de imagens do sensor Canon 600 D foi igual a 1,68 m. Para inspeção dos *outliers*, foi adotado o valor de k igual a 3, de modo a excluir no máximo 20% de pontos anômalos da amostra.

Assim, as discrepâncias superiores a 5,04 metros foram retiradas das análises posteriores. Já para os produtos do sensor Canon ELPH 110 S, a variância a priori foi de 0,73 m para o ortomosaico e 1,28 m para o MDT. E, para os produtos do sensor Sequóia, a variância foi de 0,56 m e 0,42 m para o ortomosaico e MDT, respectivamente. Estes foram multiplicados por k igual a 2,5 de modo que as discrepâncias EN do ortomosaico Canon ELPH 110S + SfM maiores que 1,82 m foram excluídas e para o ortomosaico Sequóia + SfM foram eliminadas as maiores que 1,40 m. Já para as discrepâncias dos MDTs foram retirados das amostras, as discrepâncias que superaram o valor de 3,20 m e 1,40, respectivamente, (Tabela 25).

Tabela 25 - Desvio padrão a priori e inspeção de *outliers* nas discrepâncias horizontais e verticais dos produtos cartográficos digitais

Sensor +SfM	Variância a Priori (m)			Outlier (m)		Número de pontos de checagem	Outlier (m) (%)	
	EN	h/MDT	k	EN	h/MDT		EN	h/MDT
Canon EOS 600 D	1,68	1,68	3,0	5,04	5,04	23	0,0 (0%)	4,0 (17%)
Canon ELPH 110 S	0,73	1,28	2,5	1,82	3,20	31	3,0 (10%)	3,0 (10%)
Parrot Sequóia	0,56	0,42	2,5	1,40	1,05	31	3,0 (10%)	3,0 (10%)

Na inspeção de *outliers* dos produtos da UHE Alvaro de Souza Lima gerados com imagens da Canon EOS 600 D + SfM, pelo critério adotado para o erro esperado a priori, nenhum ponto anômalo foi detectado em EN. No entanto, em h, 4 pontos (17,4%) foram identificados e excluídos da análise (14, 16, 17 e 18), Tabela 26. Para os produtos cartográficos do Lago UNISINOS Sequóia + SfM, 3 pontos foram detectados e retirados do conjunto amostral, 25, 26 e 27 para EN de ambos sensores e 25, 26 e 27 para o MDT da Canon ELPH 110 S + SfM, 24, 26 e 27 para o MDT da Sequóia + SfM, Tabelas 27 e 28.

De acordo com Bustos (1981), geralmente em medições de engenharia, encontram-se de 10 a 20% de erros grosseiros. Como recomendado por Domingo (2000), Atkinson (2005) e Rocha (2002), cabe relatar a causa de esses pontos serem anômalos ou atípicos. Neste caso, os mesmos localizam-se no talude da barragem, com declividade superior a 40%. Como

instruído pela USGS (1998), pontos de checagem verificados em linhas de quebra do modelo resultam em baixa precisão devido aos métodos de interpolação. Além disso, o método de levantamento GNSS, rápido e estático no modo RTK, apresenta falha de sinal por obstrução do relevo e a posição é influenciada pelo multicaminhamento, como enunciado por Monico (1998).

De posse das discrepâncias em EN e h inspecionadas seguiu-se com a análise das hipóteses prévias de independência, normalidade e aleatoriedade da amostra.

Tabela 26 - Diferenças entre as coordenadas UTM 22S, no SIRGAS 2000, dos pontos de checagem GNSS e do ortomosaico e MDT_{RPAS} da UHE Bariri, SP (Canon 600 D + SfM)

Pto de Chec.	GNSS SIRGAS2000, UTM 22 S			ORTOMOSAICO RPAS, SIRGAS2000, UTM 22			Discrepâncias			
	E (m)	N (m)	h (m)	E (m)	N (m)	h (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)	ΔEN (m)
1	732415,880	7548712,664	428,260	732415,659	7548712,155	426,839	-0,221	-0,509	-1,421	0,555
2	732632,556	7548273,361	431,350	732632,229	7548272,931	432,176	-0,327	-0,430	0,826	0,540
3	732368,135	7548296,127	421,567	732367,478	7548295,912	422,817	-0,657	-0,215	1,250	0,692
4	732409,110	7548355,373	423,659	732408,483	7548355,959	425,282	-0,627	0,586	1,623	0,858
5	732452,857	7548394,397	427,300	732453,271	7548393,093	427,544	0,414	-1,304	0,244	1,369
6	732456,962	7548365,665	423,639	732456,239	7548366,199	425,638	-0,723	0,534	1,999	0,899
7	732552,877	7548505,123	430,058	732552,021	7548505,067	429,204	-0,856	-0,056	-0,854	0,858
8	732605,272	7548466,495	430,731	732604,758	7548467,872	430,177	-0,514	1,378	-0,554	1,470
9	732502,244	7548620,848	429,946	732501,662	7548622,143	428,196	-0,582	1,295	-1,750	1,420
10	732624,010	7548347,352	430,635	732623,758	7548346,028	432,321	-0,252	-1,324	1,686	1,348
11	732614,717	7548368,845	430,792	732614,166	7548367,375	431,502	-0,551	-1,470	0,710	1,570
12	732594,592	7548414,077	430,882	732593,582	7548413,913	430,921	-1,010	-0,164	0,039	1,023
13	732028,566	7548635,981	403,850	732027,952	7548636,282	404,356	-0,614	0,301	0,506	0,683
14	732208,929	7548634,388	429,118	732208,173	7548634,079	423,873	-0,756	-0,309	-5,245	0,817
15	732006,331	7548628,813	403,387	732006,997	7548628,821	404,201	0,666	0,008	0,814	0,666
16	732030,978	7548610,594	428,310	732030,412	7548611,011	412,787	-0,566	0,417	-15,523	0,703
17	732039,736	7548586,174	428,970	732039,024	7548586,286	421,575	-0,712	0,113	-7,395	0,721
18	732206,322	7548670,926	424,333	732205,553	7548671,286	415,560	-0,769	0,360	-8,773	0,849
19	732469,929	7548498,415	427,796	732468,900	7548497,777	428,485	-1,029	-0,638	0,688	1,211
20	732462,784	7548532,199	427,787	732461,74	7548531,479	428,192	-1,044	-0,720	0,405	1,268
21	732500,776	7548713,101	431,527	732500,312	7548712,075	429,600	-0,464	-1,026	-1,927	1,126
22	732514,245	7548658,780	430,933	732513,647	7548657,783	428,375	-0,598	-0,997	-2,557	1,163
23	732541,846	7548546,439	430,727	732541,456	7548545,449	429,169	-0,390	-0,9898	-1,558	1,064

Outliers:

$\Delta h > 3\sigma_0$

Tabela 27 - Diferenças entre as coordenadas UTM 22S, no SIRGAS 2000, dos pontos de checagem GNSS e do ortomosaico e MDTRPAS do Lago Unisinos (Canon ELPH 110 S + SfM)

Id Pto Chec.	Coord. GNSS, UTM 22S			Coord. Orto e MDT (RPAS), UTM 22 S			Discrepâncias (m)			
	E (m)	N (m)	h (m)	E (m)	N (m)	h (m)	dE	dN	dEN	dh
1	484741,900	6703662,118	46,890	484741,998	6703661,810	46,460	0,098	-0,308	0,323	-0,430
2	484699,526	6703669,362	45,925	484699,704	6703669,132	44,179	0,178	-0,230	0,291	-1,746
3	484684,474	6703695,126	45,716	484684,713	6703695,072	44,229	0,239	-0,054	0,245	-1,487
4	484655,531	6703698,423	45,554	484655,399	6703698,589	43,543	-0,132	0,166	0,212	-2,011
5	484638,835	6703719,289	45,701	484638,151	6703719,314	44,042	-0,684	0,025	0,684	-1,659
6	484601,085	6703736,212	45,977	484600,029	6703736,438	43,541	-1,056	0,226	1,080	-2,436
7	484592,561	6703763,841	46,600	484591,603	6703764,307	44,692	-0,958	0,466	1,065	-1,908
8	484653,322	6703896,080	54,213	484652,658	6703896,507	53,521	-0,664	0,427	0,789	-0,692
9	484667,239	6703917,663	54,800	484667,111	6703917,777	55,163	-0,128	0,114	0,171	0,363
10	484692,018	6703924,226	55,327	484691,476	6703924,430	53,898	-0,542	0,204	0,580	-1,429
11	484696,196	6703945,256	55,661	484696,329	6703945,339	56,104	0,133	0,083	0,157	0,443
12	484718,621	6703959,030	56,116	484718,547	6703959,287	55,743	-0,074	0,257	0,267	-0,373
13	484710,465	6703982,698	56,289	484710,618	6703982,813	56,950	0,153	0,115	0,192	0,661
14	484731,921	6704001,073	56,767	484731,806	6704000,988	56,456	-0,115	-0,085	0,143	-0,311
15	484706,038	6704014,886	56,913	484706,044	6704015,025	57,352	0,006	0,139	0,139	0,439
16	484718,873	6704025,286	57,364	484718,918	6704025,233	57,968	0,045	-0,053	0,069	0,604
17	484733,328	6704086,136	58,925	484733,497	6704086,166	59,065	0,169	0,030	0,171	0,140
18	484760,821	6704097,469	56,835	484760,916	6704097,687	56,583	0,095	0,218	0,238	-0,252
19	484818,840	6704093,195	52,126	484818,767	6704093,835	51,434	-0,073	0,640	0,644	-0,692
20	484841,966	6704079,865	49,460	484842,082	6704079,969	50,047	0,116	0,104	0,155	0,587
21	484860,328	6704084,063	49,529	484860,366	6704084,209	50,077	0,038	0,146	0,151	0,548
22	484843,396	6704046,316	48,787	484843,588	6704046,374	49,443	0,192	0,058	0,201	0,656
23	484849,643	6704016,739	48,361	484849,601	6704016,875	48,288	-0,042	0,136	0,143	-0,073
24	484867,852	6704001,495	48,257	484867,871	6704001,659	48,094	0,019	0,164	0,165	-0,163
25	484862,289	6703973,548	49,319	484863,290	6703972,113	45,266	1,001	-1,435	1,749	-4,053
26	484843,330	6703952,821	50,679	484843,084	6703950,271	42,577	-0,246	-2,550	2,562	-8,102
27	484801,119	6703909,906	45,118	484803,762	6703909,300	40,484	2,643	-0,606	2,712	-4,634
28	484823,892	6703878,862	46,225	484823,587	6703877,449	44,236	-0,305	-1,413	1,445	-1,989
29	484792,972	6703824,463	46,072	484793,236	6703824,330	46,406	0,264	-0,133	0,296	0,334
30	484773,567	6703775,666	46,111	484774,012	6703775,382	45,997	0,445	-0,284	0,528	-0,114
31	484749,029	6703680,316	46,115	484749,292	6703680,200	45,647	0,263	-0,116	0,288	-0,468

Outliers, $\Delta EN > 2,5\sigma$

Outliers, $\Delta h > 2,5\sigma$

Tabela 28 - Diferenças entre as coordenadas UTM 22S, no SIRGAS 2000, dos pontos de checagem GNSS e do ortomosaico e MDTRPAS do Lago Unisinos (Sequóia + SfM)

Coord. GNSS UTM, 22S			Coord. Orto e MDT UTM, 22S			Discrepâncias (m)				
Id. Pto. Chec.	E (m)	N (m)	h (m)	E (m)	N (m)	h (m)	dE	dN	dEN	dh
1	484741,900	6703662,118	46,890	484742,290	6703662,010	47,143	0,390	-0,108	0,405	0,253
2	484699,526	6703669,362	45,925	484699,450	6703669,160	46,085	-0,076	-0,202	0,216	0,160
3	484684,474	6703695,126	45,716	484684,620	6703694,820	45,839	0,146	-0,306	0,339	0,123
4	484655,531	6703698,423	45,554	484655,090	6703698,280	45,686	-0,441	-0,143	0,464	0,132
5	484638,835	6703719,289	45,701	484638,400	6703719,110	45,860	-0,435	-0,179	0,470	0,158
6	484601,085	6703736,212	45,977	484600,280	6703736,130	46,245	-0,805	-0,082	0,809	0,268
7	484592,561	6703763,841	46,600	484591,770	6703764,020	46,713	-0,791	0,179	0,811	0,113
8	484653,322	6703896,080	54,213	484653,260	6703896,280	54,961	-0,062	0,200	0,209	0,748
9	484667,239	6703917,663	54,800	484667,070	6703917,740	55,343	-0,169	0,077	0,186	0,543
10	484692,018	6703924,226	55,327	484691,990	6703924,340	55,871	-0,028	0,114	0,117	0,544
11	484696,196	6703945,256	55,661	484696,280	6703945,480	56,337	0,084	0,224	0,239	0,676
12	484718,621	6703959,030	56,116	484718,712	6703959,170	56,677	0,091	0,140	0,167	0,561
13	484710,465	6703982,698	56,289	484710,470	6703982,850	56,856	0,005	0,152	0,152	0,567
14	484731,921	6704001,073	56,767	484731,910	6704001,260	57,477	-0,011	0,187	0,187	0,710
15	484706,038	6704014,886	56,913	484706,050	6704015,300	57,449	0,012	0,414	0,414	0,536
16	484718,873	6704025,286	57,364	484718,870	6704025,550	57,933	-0,003	0,264	0,264	0,569
17	484733,328	6704086,136	58,925	484733,390	6704086,380	59,464	0,062	0,244	0,252	0,539
18	484760,821	6704097,469	56,835	484761,000	6704097,640	57,316	0,179	0,171	0,248	0,481
19	484818,840	6704093,195	52,126	484818,950	6704093,040	52,616	0,110	-0,155	0,190	0,490
20	484841,966	6704079,865	49,460	484842,130	6704079,640	50,092	0,164	-0,225	0,278	0,632
21	484860,328	6704084,063	49,529	484860,370	6704083,740	50,098	0,042	-0,323	0,326	0,569
22	484843,396	6704046,316	48,787	484843,560	6704046,200	49,276	0,164	-0,116	0,201	0,489
23	484849,643	6704016,739	48,361	484849,680	6704016,540	48,984	0,037	-0,199	0,202	0,623
24	484867,852	6704001,495	48,257	484867,880	6704001,340	49,774	0,028	-0,155	0,158	1,517
25	484862,289	6703973,548	49,319	484863,860	6703972,190	48,967	1,571	-1,358	2,077	0,352
26	484843,330	6703952,821	50,679	484843,750	6703950,950	47,099	0,420	-1,871	1,918	-3,580
27	484801,119	6703909,906	45,118	484802,460	6703909,050	46,316	1,341	-0,856	1,591	1,198
28	484823,892	6703878,862	46,225	484824,310	6703878,780	46,882	0,418	-0,082	0,426	0,657
29	484792,972	6703824,463	46,072	484793,480	6703824,230	46,571	0,508	-0,233	0,559	0,499
30	484773,567	6703775,666	46,111	484774,060	6703775,520	46,608	0,493	-0,146	0,514	0,497
31	484749,029	6703680,316	46,115	484749,430	6703680,170	46,412	0,401	-0,146	0,427	0,297

Outliers, $\Delta EN > 2,5\sigma$

Outliers, $\Delta h > 2,5\sigma$

7.3 Verificação das Hipóteses Prévias para as Discrepâncias EN e h dos Produtos Cartográficos Digitais

7.3.1 Teste de Independência das Discrepâncias EN e h

7.3.1.1. Dos produtos do Sensor Canon EOS 600D + SfM

A independência das discrepâncias, EN e h, foi verificada por meio da análise geostatística, como relatado no ítem 4.5.1. Foram construídos 5 semivariogramas nas direções 0°, -45°, 45°, 60° e 90°, com *lag de* 30 metros. A espacialização dos pontos e os semivariogramas são apresentados nas Figuras 34 e 35.

Figura 34 - Distribuição espacial e semivariogramas das discrepâncias EN do ortomosaico Canon EOS 600D + SfM e semivariogramas 0°, -45°, 45°, 60° e 90°

Em todas as direções analisadas para as discrepâncias EN, observa-se que não é possível identificar os elementos principais para construção da função de correlação (o alcance, o efeito pepita, a contribuição e o patamar) entre as discrepâncias medidas e as distâncias verificadas no semivariograma. Isto demonstra que os dados são independentes. No entanto, Santos (2015) observou correlação nas discrepâncias EN. Porém, não observou

dependência no resíduo padrão e ressalta que produtos cartográficos, devido a sua natureza espacial, geralmente são correlacionados.

Figura 35 - Distribuição e discrepâncias dos pontos de amostragem (h) do MDT Canon EOS 600D + SfM e semivariogramas 0°, -45°, 45° e 90°

As discrepâncias em h, também, se apresentaram independentes da distância, pois em nenhuma direção pode ser detectado os elementos do semivariograma. De acordo com o gráfico da espacialização de Δh , observa-se que as maiores discrepâncias ($\sim 2,0$ metros) ocorreram nas áreas com maior cobertura de vegetação e onde foram observadas falha de recobrimento durante o voo devido à manobra do RPAS. Isto justifica a recomendação de ASPRS (2015) em avaliar a exatidão posicional para áreas vegetadas e não vegetadas de modo independente.

7.3.1.2 Dos produtos da Canon ELPH 110 S + SfM

A independência das discrepâncias horizontais e verticais dos produtos cartográficos gerados com imagens Canon ELPH 110 S + SfM foi verificada por meio da análise geoestatística, como relatado no item 4.5.1. Foram construídos 5 semivariogramas para cada discrepância, nas seguintes direções 0° , -45° , 30° , 45° e 90° , com *lag* 30 metros. A espacialização dos pontos e os semivariogramas são apresentados nas Figuras 36 e 37.

Figura 36 - Distribuição espacial e semivariogramas das discrepâncias EN através da câmera Canon ELPH 110S+SfM

Em todas as direções analisadas para as discrepâncias EN do ortomosaico Canon ELPH 110S, observa-se que não é possível identificar os elementos principais para construção da função de correlação (o alcance, o efeito pepita, a contribuição e o patamar) entre as

discrepâncias medidas e as distâncias, o que demonstra que os dados são independentes.

Figura 37 - Distribuição espacial e semivariogramas a 0°, -45°, 30°, 45° e 90° das discrepâncias h extraídas do MDT Canon- ELPH 110S + SfM

As discrepâncias h também se apresentaram independentes da distância. Uma vez que nas direções analisadas não se detectou os elementos principais para construção do semivariograma.

7.3.1.3 Dos produtos do sensor Sequóia + SfM

A independência das discrepâncias EN e h dos produtos do sensor Sequóia + SfM foi verificada por meio da análise geoestatística, como relatado no item 4.5.1. Foram construídos

5 semivariogramas para cada discrepância, nas seguintes direções 0° , -45° , 30° , 45° e 90° , com *lag* 30 metros. A espacialização dos pontos e os semivariogramas de EN são apresentados nas Figuras 38 e 39.

Figura 38 - Distribuição espacial e semivariogramas das discrepâncias EN através do sensor Sequoia + SfM

Nas direções analisadas para as discrepâncias EN do ortomosaico Sequóia +SfM, também não foram identificados os elementos principais para construção da função de correlação (o alcance, o efeito pepita, a contribuição e o patamar) com as distâncias, o que demonstra que os dados são independentes.

Figura 39 - Distribuição das discrepâncias h dos pontos de amostragem através do sensor Sequoia e semivariogramas a 0° , -45° , 30° , 45° e 90°

Como pode ser observado na figura acima, as discrepâncias verticais dos produtos cartográficos oriundos do imageamento com o sensor Sequoia mostraram-se independentes da distância.

7.3.2 Teste de Normalidade das Discrepâncias Horizontais e Verticais

A normalidade das discrepâncias horizontais e verticais foi verificada através da análise do histograma das discrepâncias comparada com a função de distribuição de probabilidades de Shapiro-Wilk (1965), como descrito em 4.5.2, por meio do software R (*R Team*, Anexo 1, 2012).

As hipóteses prévias estabelecidas ao nível de significância de 0,05 estão descritas a seguir.

H_0 : a distribuição das discrepâncias EN/ h cumprem a função normal

H_1 : a distribuição das discrepâncias EN/ h não cumprem a função normal

Nas Figuras 40, 41 e 42 são apresentados o histograma e a função de Shapiro Wilk para as discrepâncias EN e h dos produtos cartográficos oriundos dos sensores Canon EOS 600 D, Canon ELPH 110 S e Sequóia, respectivamente.

Figura 40 - Teste de normalidade pela função de Shapiro-Wilk para as discrepâncias EN e h dos produtos Canon EOS 600D + SfM, ao nível de significância de 0,05

Para os produtos cartográficos da câmera Canon EOS 600 D + SfM, o p-valor do teste de normalidade da função de Shapiro-Wilk para as discrepâncias EN foi de 0,218 ($> 0,05$) e para h, p-valor igual a 0,292 ($> 0,05$). Assim, tanto as discrepâncias horizontais e verticais possuem uma distribuição normal com nível de confiança de 0,05 e 22 graus de liberdade para EN e 18 para h .

Figura 41 - Teste de normalidade das discrepâncias EN e h do ortomosaico e MDT gerados com as imagens coletadas através do sensor Canon ELPH 110S +SfM

O p-valor do teste de Shapiro-Wilk para as discrepâncias horizontais e verticais observadas no ortomosaico e MDT, com origem nas imagens da câmera Canon ELPH 110S +SfM, foi de 0,00 e 0,01, respectivamente. Como p-valor, em ambos, foi menor que 0,05, os resultados conduzem a não aceitar a hipótese nula ao nível de confiança de 95% para 27 graus de liberdade, ou seja, as discrepâncias não apresentaram distribuição normal. Diante desse resultado, foi realizado um novo teste aplicando-se o Teorema do Limite Central (TLC). Foram calculadas as médias, agrupando-se as discrepâncias 3 a 3, e realizado um novo teste de normalidade. Nessa iteração, p-valor foi de 0,001 e 0,00 para EN e h, respectivamente. Novamente, confirmou-se que a hipótese nula não deve ser aceita ao nível de significância de 0,05 e com 27 graus de liberdade.

Figura 42 - Resultado do teste de normalidade Shapiro-Wilk para EN e h obtidos através do sensor Sequoia + SfM

As discrepâncias EN e h dos produtos do sensor Sequóia também não apresentaram distribuição normal de acordo com o teste de Shapiro-Wilk, com p-valor menor que 0,001 nos dois casos. De forma análoga ao executado com as discrepâncias da câmera Canon ELPH 110S, foi aplicado o TLC, agrupando-se os dados 3 a 3. Os resultados conduziram a não normalidade, confirmando que a hipótese nula não foi aceita ao nível de significância de 95% e com 27 graus de liberdade.

7.3.3 Teste de Aleatoriedade das Discrepâncias EN e h

7.3.3.1 dos Produtos do Sensor Canon EOS 600D + SfM.

O teste de aleatoriedade das discrepâncias, EN e h, foi realizado pelo método não paramétrico, teste de sequência descrito na seção 4.5.3. Primeiro, determinou-se a mediana da amostra das discrepâncias EN e h. Em seguida, elaboraram-se as hipóteses prévias como descrito a seguir:

H_0 : as discrepâncias EN/ h são aleatoriamente distribuídas

H_1 : as discrepâncias EN/ h não são aleatoriamente distribuídas

Assim, como a mediana das discrepâncias EN é igual a 0,899 m, a hipótese nula e alternativa são as descritas abaixo:

H_0 : discrepância EN $\geq$ 0,899 m

H_1 : discrepância EN $<$ 0,899 m

No teste de sequências, as discrepâncias EN foram ordenadas e receberam letras S para sim e N para não, em relação à H_0 . Na Tabela 29 é apresentado o resultado do teste em relação à mediana das discrepâncias EN.

Tabela 29 - Teste de sequência para as discrepâncias EN do ortomosaico da câmera Canon EOS 600D + SfM, com base nas hipóteses prévias onde $H_0 \geq 0,899$ m e $H_1 < 0,899$ m

0,555	0,539	0,692	0,858	1,369	0,899	0,858	1,470
N	N	N	N	S	S	N	S
1,420	1,347	1,570	1,023	0,683	0,817	0,666	0,703
S	S	S	S	N	N	N	N
0,721	0,849	1,211	1,268	1,125	1,162	1,063	
N	N	S	S	S	S	S	

De acordo com o teste de sequência para as discrepâncias EN do ortomosaico originado das imagens da câmera Canon EOS 600D + SfM, foram formados 6 grupos, ou seja, $R = 6$. A região de rejeição de acordo com a Tabela de Valores críticos de R para o teste bicaudal de sequência (Mann, 2006), para $n_1 = 12$ e $n_2 = 11$ ao nível de significância de 0,05,

tem-se o valor crítico inferior igual a 7 e valor crítico no limite superior igual a 18. Assim, este teste rejeitou a hipótese nula, ou seja, que as discrepâncias EN não possuem distribuição aleatória ao nível de significância de 5%.

Diante da análise de hipóteses prévias, observou-se que as discrepâncias EN são independentes, não aleatórias e apresentam distribuição normal.

Para as discrepâncias h, a mediana é igual a -0,405 m, assim foi aplicado o teste de sequências para verificar a aleatoriedade da distribuição da amostra de acordo com as hipóteses prévias abaixo.

$$H_0 : \text{discrepância } h \geq -0,405 \text{ m}$$

$$H_1 : \text{discrepância } h < -0,405 \text{ m}$$

As discrepâncias h foram ordenadas e receberam S a favor de H_0 e N contra a H_0 . Na Tabela 30 é mostrada a sequência do teste para cada medida.

Tabela 30 - Teste de aleatoriedade para as discrepâncias h do MDT da câmera Canon EOS 600 D + SfM, com base nas hipóteses prévias onde $H_0 \geq -0,405 \text{ m}$ e $H_1 < -0,405 \text{ m}$

-1,421	0,826	1,250	1,623	0,244	1,999	-0,854	-0,554
N	S	S	S	S	S	N	N
-1,750	1,686	0,710	0,039	0,506	0,814	0,688	0,405
N	S	S	S	S	S	S	S
-1,927	-2,557	-1,558					
N	N	N					

De acordo com a sequência acima, $R = 5$. A região de rejeição, de acordo com a Tabela de Valores críticos de R para o teste bicaudal de sequência (MANN, 2006), ou seja, para $n_1 = 12$ e $n_2 = 7$ ao nível de significância de 0,05, tem o valor crítico inferior igual a 5 e valor crítico superior igual a 14. Assim, aceita-se a hipótese nula, ou seja, que as discrepâncias h possuem uma distribuição aleatória ao nível de significância de 5%.

Diante das análises de hipóteses prévias, observou-se que as discrepâncias h são independentes, aleatórias e apresentam distribuição normal. Diante disso, pode-se seguir com a análise da exatidão posicional com base em testes paramétricos.

7.3.3.2 Dos Produtos dos Sensores Canon ELPH 110 S + SfM

O teste de aleatoriedade das discrepâncias EN/h foi realizado pelo teste de sequências,

como apresentado na seção 5.3. Determinou-se a mediana das amostras EN e h, e elaborou-se as hipóteses prévias descritas a seguir.

H_0 : discrepâncias EN/h são aleatoriamente distribuídas

H_1 : discrepâncias EN/h não são aleatoriamente distribuídas

O teste de sequências para a mediana para as discrepâncias EN do ortomosaico Canon ELPH 110S + SfM foi realizado da seguinte maneira:

H_0 : *discrepância* $\geq 0,256$ m

H_1 : *discrepância* $< 0,256$ m

As discrepâncias EN foram ordenadas e receberam a letra S (sim) quando a favor de H_0 e N (não), quando contra H_0 . Na Tabela 31 é apresentada a realização do teste de sequências.

Tabela 31 - Teste de aleatoriedade para as discrepâncias EN do ortomosaico da câmera Cano ELPH 110S + SfM, com base nas hipóteses prévias onde $H_0 \geq 0,256$ m e $H_1 < 0,256$ m

0,323	0,291	0,245	0,212	0,684	1,080	1,065	0,789
S	S	N	N	S	S	S	S
0,171	0,580	0,157	0,267	0,192	0,143	0,139	0,069
N	S	N	S	N	N	N	N
0,171	0,238	0,644	0,155	0,151	0,201	0,143	0,165
N	N	S	N	N	N	N	N
1,445	0,296	0,528	0,288				
S	S	S	S				

De acordo com a sequência da tabela acima, tem-se que $R = 12$, para $n_1 = 13$ e $n_2 = 15$. Como $n_2 = 15$, calculou-se Z pela Eq. 25, obtendo-se o resultado 1,133. Consultando uma Tabela de normalidade padronizada, encontra-se o valor de 0,455 para um teste unicaudal. Multiplicando este resultado por 2, o resultado foi 0,91, ou seja, a probabilidade das discrepâncias EN serem maiores que a mediana é de 91%. Assim, não se rejeita a hipótese nula com nível de confiança de 90%. A amostra possui distribuição aleatória.

O teste de aleatoriedade das discrepâncias h foi realizado como apresentado na seção Assim, foi determinado à mediana das discrepâncias h e elaborado as hipóteses prévias como descrito a seguir.

H_0 : discrepâncias h são aleatoriamente distribuídas

H_1 : discrepâncias h não são aleatoriamente distribuídas

Assim, o teste de sequência com base na mediana foi realizado da seguinte maneira:

H_0 : discrepância $\geq -0,282 \text{ m}$

H_1 : discrepância $< -0,282 \text{ m}$

As discrepâncias h foram ordenadas e receberam S quando a favor de H_0 e N quando contra a H_0 . Na Tabela 32 é mostrada a sequência do teste para cada medida.

Tabela 32 - Teste de aleatoriedade para as discrepâncias h obtidas no MDT da câmera Canon + SfM, com base nas hipóteses prévias onde $H_0 \geq 0,282 \text{ m}$ e $H_1 < 0,282 \text{ m}$

-0,43	-1,746	-1,487	-2,011	-1,659	-2,436	-1,908	-0,692
N	N	N	N	N	N	N	N
0,363	-1,429	0,443	-0,373	0,661	-0,311	0,439	0,604
S	N	S	N	S	N	S	S
0,14	-0,252	-0,692	0,587	0,548	0,656	-0,073	-0,163
S	S	N	S	S	S	S	S
-1,989	0,334	-0,114	-0,468				
N	S	S	N				

Como pode ser observado no teste de sequência acima, $R = 13$, $n_1 = 14$ e $n_2 = 14$. Como n_1 e n_2 são menores que 15, os valores críticos para R , de acordo com a tabela de valores críticos para o teste de sequência, são 9 e 21. Como $9 < 13 < 21$, a hipótese nula não é rejeitada, ou seja, as discrepâncias h possuem distribuição aleatória.

7.3.3.3 Dos Produtos do Sensor Sequóia + SfM

O teste da mediana para o ortomosaico gerado com imagens através do sensor Sequoia foi realizado com base nas seguintes hipóteses prévias:

H_0 : discrepância $\geq 0,258 \text{ m}$

H_1 : discrepância $< 0,258 \text{ m}$

As discrepâncias EN foram ordenadas e receberam sinal positivo ou negativo, de acordo com a hipótese nula. Na Tabela 33 é apresentada a atribuição de letras S para sim e N para não em relação à H_0 para cada medida.

Tabela 33 - Teste de aleatoriedade para as discrepâncias EN, obtidas através do sensor Sequóia + SfM, com base nas hipóteses prévias onde $H_0 \geq 0,258$ m e $H_1 < 0,258$ m

0,405 S	0,216 N	0,339 S	0,464 S	0,470 S	0,809 S	0,811 S	0,209 N
0,186 N	0,117 N	0,239 N	0,167 N	0,152 N	0,187 N	0,414 S	0,264 S
0,252 N	0,248 N	0,190 N	0,278 S	0,326 S	0,201 N	0,202 N	0,158 N
0,426 S	0,559 S	0,514 S	0,427 S				

De acordo com a sequência acima, tem-se que $R = 9$, para $n_1 = 14$ e $n_2 = 14$. Como n_1 e n_2 são menores que 15, os valores limites de R foram extraídos da tabela de valores críticos para o teste de sequência, onde se obteve c_1 igual a 9 e c_2 igual a 21. Como R é igual a 9, não se rejeita a hipótese nula ao nível de 95% de confiança. Assim, as discrepâncias EN foram consideradas aleatoriamente distribuídas.

A seguir, as hipóteses prévias do teste de aleatoriedade com base na mediana para as discrepâncias h observadas no MDT do sensor Sequoia + SfM e o teste de sequência é mostrado na Tabela 34:

$$H_0 : \text{discrepância} \geq 0,518m$$

$$H_1 : \text{discrepância} < 0,518 m$$

Tabela 34 - Teste de aleatoriedade para as discrepâncias h , obtidas através do sensor Sequoia, com base nas hipóteses prévias, onde $H_0 \geq 0,518$ m e $H_1 < 0,518$ m

0,253 N	0,160 N	0,123 N	0,132 N	0,158 N	0,268 N	0,113 N	0,748 S
0,543 S	0,544 S	0,676 S	0,561 S	0,567 S	0,710 S	0,536 S	0,569 S
0,539 S	0,481 N	0,490 N	0,632 S	0,569 S	0,489 N	0,623 S	-0,352 N
0,657 S	0,499 N	0,497 N	0,297 N				

De acordo com a sequência acima, $R = 9$, $n_1 = 14$ e $n_2 = 14$. Como n_1 e n_2 são iguais

a 14, os valores críticos para R podem ser extraídos da tabela de valores críticos de R para o teste de sequência (MANN, 2006). Os limites, inferior e superior, são 9 e 21 para c_1 e c_2 , respectivamente. Como $9 < 9 < 21$, a hipótese nula não é rejeitada, ou seja, as discrepâncias h possuem distribuição aleatória.

Diante da análise de hipóteses prévias de independência, normalidade e aleatoriedade para as amostras de discrepâncias EN e h dos ortomosaicos e MDT, através dos sensores Canon ELPH 110 S + SfM e Sequóia + SfM, concluiu-se que estas discrepâncias são independentes e aleatórias. Porém, não cumpriram a função de distribuição normal de acordo com o teste de Shapiro-Wilk. Diante disso, testes não paramétricos são recomendados para análise de tendência e exatidão.

Na tabela 35 é apresentado um resumo com as medidas estatísticas e resultados das análises de hipóteses prévias para as discrepâncias horizontais e verticais dos produtos cartográficos dos três sensores.

Tabela 35 - Resumo com as medidas estatísticas e resultados das análises de hipóteses prévias para as discrepâncias EN e h dos produtos cartográficos dos sensores Canon EOS 600 D + SfM, Canon ELPH 110S + SfM e Sequóia + SfM

Sensor (+SfM)	Discrepância	Média (m)	Mediana (m)	Desvio Padrão (m)	RMSE (m)	Independência	Normalidade	Aleatoriedade
Canon EOS	EN	0,994	0,899	0,311	1,040	Sim	Sim	Não
	h	-0,008	-0,405	1,346	1,310	Sim	Sim	Sim
Canon ELPH	EN	0,386	0,256	0,345	0,514	Sim	Não	Sim
	h	-0,481	-0,282	0,970	1,060	Sim	Não	Sim
Sequóia	EN	0,330	0,258	0,182	0,375	Sim	Não	Sim
	h	0,432	0,518	0,246	0,494	Sim	Não	Sim

7.4 Verificação de erros sistemáticos para os Produtos Cartográficos Digitais

7.4.1 Teste *t* Student

Diante do resultado positivo para normalidade das amostras EN e h para os produtos originados com imagens da Canon EOS 600 D + SfM , verificadas na seção 7.3.1.1, foi aplicado o teste paramétrico de *t* Student para verificar se existe tendência nas amostras, de acordo com as seguintes hipóteses:

$$H_0: \text{média das discrepâncias EN/h} = 0$$

$$H_1: \text{média das discrepâncias EN/h} \neq 0$$

Foram calculadas as estatísticas *t* do teste *t* Student, de acordo com a Eq. 33. Estas, por sua vez, foram confrontadas com a hipótese nula de que não há tendência nas médias das discrepâncias amostrais, EN e h. Na Tabela 36, são apresentados os valores da estatística *t*, em relação à hipótese nula e a decisão tomada para tendência de EN e h.

Tabela 36 - Teste *t* Student para verificação de tendência das discrepâncias EN e h obtidos com Canon EOS 600D + SfM

Discrepância	Estatística <i>t</i>	Valor tabelado ($t_{n-1}^1, 0,05$)	Ação	Decisão
EN	15,28	1,717	Rejeita H_0	Apresenta tendência
h	0,03	1,734	Aceita H_0	Não apresenta tendência

¹Para EN, com 22 graus de liberdade e para h, com 18 graus de liberdade.

Os resultados acima permitem inferir que para a população em estudo há tendência nas discrepâncias EN. E, ainda, que há diferença entre a EN extraída do ortomosaico (Canon EOS 600D + SfM) e EN coletada com GNSS, ao nível de 5% de confiança com 22 graus de liberdade. No entanto, o teste aplicado não evidenciou tendência para a discrepância h. Assim, pode-se considerar que não houve diferença significativa entre h extraído do MDT (Canon EOS 600D+ SfM) e coletado por GNSS, ao nível de significância de 5% e com 18 graus de liberdade. Cunha et al. (2016) identificaram erros sistemáticos para o norte em uma ortofoto gerada com imagens do sensor Sony EXMOR e comentam que a tendência posicional pode estar relacionada à precisão dos equipamentos e parâmetros utilizados na coleta e

processamento dos dados. À medida que forem identificados, podem ser corrigidos.

6.4.2 Análise Direcional das discrepâncias horizontais

A análise direcional das discrepâncias EN expressa o deslocamento, em termos de azimuth, dos pontos no ortomosaico em relação aos pontos de controle GNSS. Nas tabelas 37 a 39 são apresentadas as componentes e as direções circulares para as discrepâncias observadas no ortomosaico do sensor Canon EOS 600D + SfM, Canon ELPH 110 S + SfM e Sequóia + SfM.

Tabela 37 - Azimutes das discrepâncias EN observados no ortomosaico gerado com imagens da Câmera Canon EOS 600D + SfM

Pto	Chec.	Disc. E (m)	Disc. N (m)	(m)	Azimuth (graus dec.)	Quadrante
1		0,221	0,509	0,435	22,29247785	N
2		0,327	0,430	0,761	33,03812866	NE
3		0,657	0,215	3,054	51,43725494	NE
4		0,627	-0,586	-1,069	140,6927212	SE
5		-0,414	1,304	-0,318	162,9052394	S
6		0,723	-0,534	-1,355	136,928225	SE
7		0,856	0,056	15,399	56,41452777	NE
8		0,514	-1,378	-0,373	160,3431459	S
9		0,582	-1,295	-0,449	157,1140171	SE
10		0,252	1,324	0,191	10,66400234	N
11		0,551	1,470	0,375	19,7376327	N
12		1,010	0,164	6,156	54,6503723	NE
13		0,614	-0,301	-2,041	131,880997	SE
14		0,756	0,309	2,450	49,7976111	NE
15		-0,666	-0,008	82,272	237,3164137	SW
16		0,566	-0,417	-1,356	136,9079775	SE
17		0,712	-0,113	-6,331	125,2659941	SE
18		0,769	-0,360	-2,134	131,4438288	SE
19		1,029	0,638	1,612	45,44521756	NE
20		1,044	0,720	1,449	44,03374515	NE
21		0,464	1,026	0,452	23,01706579	NE
22		0,598	0,997	0,600	28,37587655	NE
23		0,390	0,990	0,394	20,57310847	N

Tabela 38 - Azimutes das discrepâncias EN observados no ortomosaico gerado através das imagens da câmera Canon ELPH 110S + SfM

Pto Chec.	Disc. E (m)	Disc. N (m)	Azimute (graus dec.)	Quadrante
1	0,098	-0,308	162,3369295	S
2	0,178	-0,230	142,2803561	SE
3	0,239	-0,054	102,8456149	E
4	-0,132	0,166	321,4911729	NW
5	-0,684	0,025	272,0608412	W
6	-1,056	0,226	282,1073824	Nw
7	-0,958	0,466	295,9574809	W
8	-0,664	0,427	302,7528970	NW
9	-0,128	0,114	311,5711062	NW
10	-0,542	0,204	290,6437473	W
11	0,133	0,083	58,1596869	NE
12	-0,074	0,257	343,8716556	N
13	0,153	0,115	53,0900225	NE
14	-0,115	-0,085	233,4313672	SW
15	0,006	0,139	2,4478482	N
16	0,045	-0,053	139,3254005	SE
17	0,169	0,030	80,0188985	E
18	0,095	0,218	23,5167371	NE
19	-0,073	0,640	173,4760444	S
20	0,116	0,104	48,0906256	NE
21	0,038	0,146	14,3979815	N
22	0,192	0,058	73,3382885	E
23	-0,042	0,136	342,9341890	N
24	0,019	0,164	6,6959498	N
25	1,001	-1,435	145,0895320	SE
26	-0,246	-2,550	185,5137797	S
27	2,643	-0,606	102,9228585	E
28	-0,305	-1,413	192,2006895	S
29	0,264	-0,133	116,7823105	SE
30	0,445	-0,284	122,5728078	SE
31	0,263	-0,116	113,8107428	SE

Tabela 39 - Azimutes das discrepâncias EN observados no ortomosaico gerado através do Sensor Sequóia + SfM

Pto Chec.	Disc. E (m)	Disc. N (m)	Azimute (graus dec.)	Quadrante
1	0,390	-0,108	105,4786382	E
2	-0,076	-0,202	200,6181882	S
3	0,146	-0,306	154,4930619	SE
4	-0,441	-0,143	252,0340375	W
5	-0,435	-0,179	247,6331156	W
6	-0,805	-0,082	264,1837212	W
7	-0,791	0,179	282,7510317	W
8	-0,062	0,200	342,7765638	NW
9	-0,169	0,077	294,4950207	NW
10	-0,028	0,114	346,2005146	N
11	0,084	0,224	20,55604519	N
12	0,091	0,140	33,02386762	NE
13	0,005	0,152	1,884050214	N
14	-0,011	0,187	356,6335393	N
15	0,012	0,414	1,660282368	N
16	-0,003	0,264	359,3489396	N
17	0,062	0,244	14,25703537	N
18	0,179	0,171	46,30938981	NE
19	0,110	-0,155	144,6375382	SE
20	0,164	-0,225	143,9121083	SE
21	0,042	-0,323	172,5913435	S
22	0,164	-0,116	125,2724213	SE
23	0,037	-0,199	169,4672882	S
24	0,028	-0,155	169,7602254	S
25	1,571	-1,358	130,8407115	SE
26	0,420	-1,871	167,3480385	SE
27	1,341	-0,856	122,5512953	SE
28	0,418	-0,082	101,0988992	E
29	0,508	-0,233	114,6390974	SE
30	0,493	-0,146	106,4964471	E
31	0,401	-0,146	110,0060477	E

As componentes médias C e S foram calculadas pelas Eq. 35 e 36. A resultante média, a variância e desvio padrão foram obtidas pelas Eq. 37, 38 e 39. Os resultados são mostrados na Tabela 40.

Tabela 40 - Resultados da estatística circular aplicada às discrepâncias EN do ortomosaico Canon EOS 600D + SfM, Canon ELPH 110 S + SfM e Sequóia + SfM

Ortomosaico	$\bar{S}$ (m)	$\bar{C}$ (m)	$\bar{R}$ (m)	θ (graus)	Variância (m)	Desvio padrão (m)
Canon EOS 600D	-0,529	-0,224	0,575	247,060	0,425	1,052
Canon ELPH 110S	0,035	0,114	0,192	47	0,820	2,061
Sequóia	0,124	0,146	0,189	116	0,866	1,818

Na Figura 43, são apresentadas as distribuições dos pontos no círculo geográfico e a distribuição de von Mises para k igual a 1,40 para o ortomosaico da Canon EOS 600 D + SfM e k igual a 0,50 para os ortomosaicos da Canon ELPH 110S + SfM e Sequóia + SfM, conforme tabela de limites máximos para R médio (anexo 2).

Figura 43 - Análise direcional das discrepâncias EN observadas no ortomosaico Canon EOS 600D + SfM com base na função de distribuição de von Mises ($k = 1,40$) 9 (a) e Canon ELPH 110 S + SfM ($k = 0,50$) (b) e Sequóia + SfM ($k = 0,50$) (c)

Para o ortomosaico da Canon EOS 600D + SfM, há uma tendência direcional no azimute 247 graus com desvio padrão de 1,052 metros e para o ortomosaico da Canon ELPH 110S + SfM, há uma tendência de sistematismos no azimute 47 graus, com vetor médio da resultante de 0,192 metros e desvio padrão de 2,061 metros. Já para o ortomosaico Sequóia +SfM, a tendência ocorre no azimute 116 graus, com desvio padrão de 1,818 m.

Na Tabela 41 são apresentados os resultados dos testes de Rayleigh e de uniformidade

das discrepâncias direcionais dos ortomosaicos Canon EOS 600D+SfM, Canon ELPH 110S + SfM e Sequóia + SfM, cujos parâmetros dos testes de Rayleigh, uniformidade e aleatoriedade foram calculados pelas Eq. 46 a 48.

Tabela 41 - Resultados dos testes de Rayleigh e de uniformidade das discrepâncias direcionais do ortomosaico Canon EOS 600D+SfM

Ortomosaico	Teste de Rayleigh (média)		Teste de Uniformidade		Teste de Aleatoriedade	
	Z_{calc}	Z_{crit} (22; 0,05)	χ^2_{calc}	χ^2_{crit} (22; 0,05)	Z_{calc}	$P_{(Z_{\text{calc}})}$
Canon EOS 600D+ SfM	7,610	2,961	2,875	12,388	0,003	0,500
CANON+ SfM	0,444	2,971	4,355	43,773	0,001	0,500
Sequóia + SfM	1,136	2,971	12,161	43,773	0,002	0,500

No teste de Rayleid, como $Z_{\text{calc}} > Z_{\text{crit}}$ ($7,610 > 2,961$) conduz a não aceitação da hipótese nula. Ou seja, aceita-se a hipótese alternativa de que existe uma média direcional para os azimutes das discrepâncias horizontais do ortomosaico, gerado a partir do processamento das imagens Canon EOS 600 D + SfM, ao nível de significância de 0,05 e com 22 graus de liberdade. Já para os azimutes das discrepâncias horizontais dos ortomosaicos, oriundos do processamento das imagens CANON + SfM e Sequóia + SfM, nos dois casos, Z_{cal} foi menor que Z_{crit} de acordo com a tabela de valores limites deste teste ($0,444 < 2,971$ e $1,136 < 2,971$). Assim, aceita-se a hipótese nula ao nível de significância de 0,05 e com 30 graus de liberdade.

O valor de χ^2 calculado, 2,875 para Canon EOS 600 D + SfM no teste de uniformidade foi menor que χ^2 crítico (12,388). Assim, não se rejeita a hipótese nula ao nível de confiança de 0,05 e com 22 graus de liberdade, ou seja, os azimutes das discrepâncias EN apresentam distribuição uniforme. Os valores de χ^2 calculados (4,355 para Canon ELPH 110S + SfM e 12,161 para Sequóia + SfM) para as discrepâncias direcionais no teste de uniformidade foram menores que χ^2 crítico (43,773) nos dois casos, conduziram a não rejeição da hipótese nula com 30 graus de liberdade e a nível de confiança de 95%. Ou seja, os azimutes das discrepâncias apresentam distribuição uniforme em ambos ortomosaicos.

No teste de aleatoriedade, o valor de Z_{cal} apresentou probabilidade igual a 1 para a distribuição espacial dos azimutes. Desta maneira, não se rejeita a hipótese nula ao nível de confiança de 95% para o ortomosaico Canon EOS 600 D + SfM, ou seja, as direções

apresentam aleatoriedade. Para os ortomosaicos obtidos através dos sensores Canon ELPH 110S + SfM e Sequóia + SfM, o valor de Z_{cal} apresentou probabilidade igual a 1 para a distribuição espacial dos azimutes. Desta maneira, não se rejeita a hipótese nula ao nível de confiança de 95%

Em resumo, pode-se concluir que, para as discrepâncias horizontais do ortomosaico Canon EOS 600 D + SfM, há uma tendência de deslocamento no sentido Sudoeste (247,060 graus). Esse azimuth representa a média dos deslocamentos com 95% de confiança e com 22 graus de liberdade, numa amostragem uniforme aleatória. Os ortomosaicos Canon ELPH 110 S + SfM e Sequóia + Sfm têm tendência de deslocamento. No entanto, como a dispersão é grande, pode-se atribuir esse fato a erros sistemáticos cometidos durante as etapas do processo de aquisição de dados e de processamento.

7.5 Exatidão dos Produtos Cartográficos Digitais

7.5.1 Teste Qui Quadrado aplicado ao Ortomosaico e MDT da Canon EOS 600D + SfM e confrontação com PEC-PCD

Como as discrepâncias dos produtos Canon EOS 600D + SfM apresentaram distribuição normal, o Teste Qui quadrado foi aplicado para verificar o enquadramento do ortomosaico e do MDT nas classes A, B, C e D das escalas 1:2.000 e 1:5.000 para EN; 1:10.000 para h e para o MDT, do Padrão de Exatidão Cartográfica para produtos da cartografia digital do Brasil, PEC-PCD (2011). Na Tabela 42 são apresentados os valores de referência do erro padrão (EP) para as escalas testadas.

Tabela 42 - Valores de referência para o erro padrão (EP) de acordo com o padrão brasileiro de exatidão para produtos digitais

Discrepância	Classe A (m)	Classe B (m)	Classe C (m)	Classe D (m)
EN (1:2.000)	0,34	0,60	1,00	1,20
EN (1:5.000)	0,85	1,50	2,50	3,00
h (1:10.000)	1,67	2,00	3,00	3,50
MDT(1:10.000)	0,84	1,67	2,00	2,50

Recordando que na hipótese nula foi declarado que a variância amostral EN/ h era igual à variância populacional em EN.

$$H_0: s_c^2 = \sigma_c^2$$

$$H_1: s_c^2 > \sigma_c^2$$

E considerando o desvio padrão das discrepâncias EN igual a 0,311 m para $n = 23$, tem-se os resultados do teste Qui quadrado apresentados nas Tabelas 43 e 44.

Tabela 43 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão horizontal EN do ortomosaico para as classes A, B, C e D, na escala 1:2000, do PEC-PCD

1:2.000	A	B	C	D
EP-EN	0,34	0,60	1,00	1,20
χ^2_{cal}	18,41	5,91	2,13	1,48
$\chi^2(22; 0,025) = 10,982$	R H ₀ ¹	NR H ₀ ²	NR H ₀	NR H ₀
$\chi^2(22; 0,05) = 12,338$	R H ₀	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀
$\chi^2(22; 0,10) = 14,041$	R H ₀	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀
RMSE _{Hor} = 1,040	NA ³	NA	NA	A ⁴

¹R H₀ – Rejeita H₀

²NR H₀ – Não rejeita H₀

³ O RMSE_{hor} do ortomosaico não atende ao padrão de exatidão para a classe testada

⁴ O RMSE_{hor} do ortomosaico atende ao padrão de exatidão para a classe testada

Tabela 44 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão horizontal EN do ortomosaico para as classes A, B, C e D, na escala 1:5.000, do PEC-PCD

1:5.000	A	B	C	D
EP-EN	0,85	1,50	2,50	3,00
χ^2_{cal}	2,95	0,95	0,34	0,23
$\chi^2(22; 0,025) = 10,982$	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀
$\chi^2(22; 0,05) = 12,338$	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀
$\chi^2(22; 0,10) = 14,041$	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀
RMSE _{Hor} = 1,040	NA ³	A ⁴	A	A

¹R H₀ – Rejeita H₀

²NR H₀ – Não rejeita H₀

³ O RMSE_{hor} do ortomosaico não atende ao padrão de exatidão para a classe testada

⁴ O RMSE_{hor} do ortomosaico atende ao padrão de exatidão para a classe testada

A análise da exatidão horizontal por meio do teste qui-quadrado e RMSE_{hor} têm que conduzir ao mesmo resultado (SANTOS, 2015). Assim, conclui-se que o ortomosaico se enquadra na classe D, da escala 1:2000, e na classe B, da escala 1:5.000, com 97,5% de confiança e com 22 graus de liberdade. Ortofotos da fotogrametria com RPAS verificadas por testes semelhantes com enquadramento na escala 1:1000 foram relatadas por Mesas-Carracosas et al. (2014), Fonseca Neto et al. (2017) e Vitti et. al (2017). Nestes trabalhos a coleta de imagens foi executada com equipamentos diferentes em vôos a altitudes menores que 200 metros, embora com GSD semelhante (~ 5 cm). Pode-se atribuir a degradação na

escala, a dificuldade na identificação dos alvos utilizados, uma vez que esse trabalho adotou feições existentes na área como pontos de apoio e checagem.

Na Tabela 45 são apresentados os resultados do teste Qui quadrado para a discrepância na componente h na escala 1:10.000, considerando o desvio padrão nessa posição igual a 1,346 m e o $RMSE_h$ igual a 1,310 m. Coverney e Roberts (2017) relataram RMSE na elevação da fotogrametria com RPAS igual a 1,310 m para ortoimagens georreferenciadas com 5 pontos de controle.

Tabela 45 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão na elevação (h) para as classes A, B, C e D, na escala 1:10.000, do PEC-PCD

1:10.000	A	B	C	D
EP-h	1,67	2,00	3,00	3,50
χ^2_{cal}	11,69	8,15	3,62	2,66
$\chi^2(18; 0,025) = 8,230$	R H_0	NR H_0	NR H_0	NR H_0
$\chi^2(18; 0,05) = 9,390$	R H_0	NR H_0	NR H_0	NR H_0
$\chi^2(18; 0,10) = 10,865$	R H_0	NR H_0	NR H_0	NR H_0
$RMSE_h = 1,310$	A ³	A	A	A

¹R H_0 – Rejeita H_0

²NR H_0 – Não rejeita H_0

³A - O $RMSE_h$ do MDT atende ao padrão de exatidão altimétrica para a classe testada

A exatidão vertical verificada para a componente linear h com o EP e o $RMSE_h$ resultou num enquadramento do PEC-PCD, na classe B, da escala 1:10.000, com 97,5% de confiança e com 18 graus de liberdade. Nesta escala, o mapa admite o traçado de curvas de nível com equidistância vertical de 5 metros.

Na Tabela 46 são apresentados os resultados do teste Qui quadrado para a variância no MDT na escala 1:10.000, considerando o desvio padrão 3D igual a 1,381 m e o $RMSE_{MDT}$ igual a 1,673 m.

Tabela 46 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão do MDT para as classes A, B, C e D, na escala 1:10.000, do PEC-PCD

1:10.000	A	B	C	D
EP-MDT	0,84	1,67	2,00	2,50
χ^2_{cal}	48,68	12,32	8,59	5,50
$\chi^2(18; 0,025) = 8,230$	R H_0	R H_0	R H_0	NR H_0
$\chi^2(18; 0,05) = 9,390$	R H_0	R H_0	NR H_0	NR H_0
$\chi^2(18; 0,10) = 10,865$	R H_0	R H_0	NR H_0	NR H_0
$RMSE_{MDT} = 1,673$	NA ³	A ⁴	A	A

¹R H_0 – Rejeita H_0

²NR H_0 – Não rejeita H_0

³NA --O RMSE do MDT não atende ao padrão de exatidão altimétrica para a classe testada

⁴A - O RMSE do MDT atende ao padrão de exatidão altimétrica para a classe testada

De acordo com os resultados dos testes Qui-quadrado para verificação do enquadramento do MDT, o mesmo ajustou-se na classe C, da escala 1:10.000, com 95% de confiança e com 18 graus de liberdade.

Os testes estatísticos aplicados aos pontos de controle do ortomosaico e do MDT demonstraram que a amostra cumpriu os requisitos das hipóteses básicas de independência, normalidade e aleatoriedade. O desvio padrão e o RMSE horizontal foram de 0,311 m e 1,040 m, respectivamente. O desvio padrão e o RMSE da elevação foram de 1,346 e 1,310 metros. Enquanto que, para o MDT, o desvio padrão foi de 1,381 metros e o RMSE foi de 1,672 metros. Estes resultados mostraram que os produtos cartográficos RPAS + SfM para as condições deste estudo enquadraram-se na escala 1:2000 planimétrica e na escala 1:10.000 altimétrica, ambos na classe B. Já para o MDT, enquadraram-se na classe C da escala 1:10.000. Estas escalas atendem aos requisitos de mapeamento de áreas para a finalidade de cadastro de áreas de concessão no setor de energia elétrica.

7.5.2 Teste U Mann-Whitney aplicado aos ortomosaicos e MDTs Canon ELPH 110 S + SfM e Sequóia + SfM

Como os testes de Shapiro-Wilk aplicado para as discrepâncias EN e h resultaram na não confirmação da normalidade, o teste U de Mann-Whitney foi avaliado. Desta forma foi possível verificar se há diferenças significativas nas coordenadas E, N e h extraídas dos produtos cartográficos, gerados a partir do processamento SfM das imagens coletadas com o sensor Canon ELPH 110S e Sequóia embarcados no RPAS, em relação as coordenadas do levantamento diferencial GNSS RTK.

A hipótese nula pressupõe que as medianas da amostra e da população são iguais e a hipótese alternativa, que as medianas são diferentes. Assim, se confirmada a hipótese nula, pode-se inferir que os dados posicionais provenientes da fotogrametria com RPAS não apresentam diferenças significativas em relação aos dados provenientes do levantamento diferencial GNSS RTK, a um nível de significância de 95%.

$$H_0: \text{mediana GNSS} = \text{mediana RPAS}$$

$$H_1: \text{mediana GNSS} \neq \text{mediana RPAS}$$

Nas Tabelas 47 e 48 são apresentadas as medidas estatísticas, do teste U de Mann-Whitney, aplicadas às coordenadas E, N e h dos pontos de controle em relação aos pontos homólogos extraídos do ortomosaico e MDT, a partir dos sensores Canon ELPH 110 S+ SfM e Sequóia, como apresentado na seção 5.4.8.

Tabela 47 - Resultados do Teste U de Mann-Whitney aplicados aos dados do ortomosaico e MDT obtidos a partir de imagens da câmera Canon ELPH 110S para $Z_{\text{crítico}} = 1,96$ ao nível de 95% de confiança

Coordenada	n_1	n_2	R_1	R_2	U	Z_{cal}	Decisão
E	28	28	796	797	393	0,124	Não rejeita H_0
N	28	28	793	848	342	6,186	rejeita H_0
h	28	28	833	688	357	4,330	rejeita H_0

Como podem ser observados na Tabela 67, os resultados do teste U de Mann-Whitney aplicado aos dados da câmera Canon ELPH 110S demonstraram que não se pode rejeitar a hipótese nula, uma vez que $Z_{\text{cal}} < Z_{\text{crítico}}$ apenas para a posição E. No entanto, o teste para N e h, Z_{cal} apresentou-se maior do que $Z_{\text{crítico}}$. Com base nestes resultados, pode-se inferir que os dados posicionais provenientes da câmera Canon ELPH 110S apresentam diferenças significativas em relação aos dados coletados com diferencial GNSS RTK, a um nível de confiança de 95%.

Tabela 48 - Resultados do Teste U de Mann-Whitney aplicados aos dados do ortomosaico e MDT a partir de imagens obtidas através do sensor Sequóia para $Z_{\text{crítico}} = 1,96$ ao nível de 95% de confiança

Coord.	n_1	n_2	R_1	R_2	U	Z_{cal}	Decisão
E	28	28	795	801	389	-0,371	Não rejeita H_0
N	28	28	800	796	390	-0,247	Não rejeita H_0
H	28	28	755	802	393	-0,495	Não rejeita H_0

Como podem ser observados na Tabela 68, os resultados do teste U de Mann-Whitney aplicado às coordenadas do sensor Sequóia demonstraram que não se rejeita a hipótese nula, uma vez que $Z_{\text{cal}} < Z_{\text{crítico}}$, ($0,371 < 1,96$ para E, $0,247 < 1,96$ para N e $0,495 < 1,96$ para h). Assim, os dados posicionais provenientes do sensor Sequóia não apresentam diferenças

significativas em relação aos dados coletados com o diferencial GNSS RTK a um nível de confiança de 95%.

O teste U de Mann-Whitney para as amostras testadas demonstrou que o ortomosaico e o MDT, originários das imagens do sensor Sequóia e processados pelo método SfM, produzem posições 3D semelhantes às coordenadas levantadas no campo com o GNSS diferencial RTK a um nível de confiança de 95%. Porém, o mesmo teste aplicado aos produtos originários das imagens obtidas através da câmera Canon ELPH 110S + SfM apresentou resultado diferente. Ou seja, as posições 3D não se assemelham às coordenadas coletadas no campo com o GNSS diferencial RTK a um mesmo nível de confiança (95%).

O valor de k do teorema de Chebyshev para probabilidade de 90% foi igual a 3,26. Assim, os desvios padrões dos produtos cartográficos dos sensores Canon ELPH 110S + SfM e Sequóia + SfM foram multiplicados por este valor e compostos juntamente com a média, indicam as apresentados na Tabela 49.

Tabela 49 - Precisões horizontais e verticais dos produtos cartográficos dos sensores Canon ELPH 110S + SfM e Sequóia + SfM, de acordo com o teorema de Chebyshev

Produto	Canon ELPH 110 S + SfM	Sequóia + SfM
Ortomosaico	0,386 m $\pm$ 1,091 m	0,330 m $\pm$ 0,576 m
h (m)	-0,481 m $\pm$ 3,067 m	0,432 m $\pm$ 0,778 m
MDT (m)	0,617 m $\pm$ 3,257 m	0,544 m $\pm$ 0,968 m

Quando a probabilidade das discrepâncias amostrais não apresenta distribuição normal, a média e desvio padrão podem não representar a média e desvio padrão da população. Assim, testes não paramétricos de inferência baseados na mediana, por não necessitarem da suposição de normalidade populacional, são mais indicados para análise da exatidão posicional (MANN, 2006). López-Rodrigues et al. (2007) recomendam o teste U de Mann-Whitney. Estes autores utilizaram esse teste para diferenciar precisões em diferentes dispositivos de posicionamento absoluto, o qual se mostrou bastante eficiente.

De acordo com o Teorema de Chebichev, considerando a probabilidade de 90% para a distribuição livre, o valor de k é de 3,16. Assim, pode-se afirmar que a precisão dos produtos, gerados através da câmera Canon + SfM, foram de 0,386 $\pm$ 1,091 m para o

ortomosaico, de $-0,481 \pm 3,067$ m para a altimetria e de $0,617 \pm 3,257$ m para o MDT. E para os produtos gerados através do sensor Sequóia + SfM, foram de $0,330 \pm 0,576$ m para o ortomosaico, de $0,432 \pm 0,778$ m para a altimetria e de $0,544 \pm 0,968$ m para o MDT.

Os resultados encontrados mostraram exatidão posicional menor em relação aos trabalhos analisados por Fonstand et al. (2013), Fonseca Neto et al. (2017), Jaud et al. (2016), Harwin e Lucieer (2012) e Lalliberte et al. (2010). Isso pode ser explicado pelas diferenças metodológicas na coleta de dados, processamento e na avaliação da exatidão.

Gidraux et al (2017) comentam que a exatidão posicional do MDS é fortemente influenciada pela textura das imagens que está relacionada com a identificação de pontos de interesse na geração de nuvem esparsa de pontos, pela distância focal do sensor e pela altura de vôo que afeta a sobreposição de imagens.

Isto deve-se, por exemplo, à diversidade de RPAS e sensores e aos voos efetuados a menores altitudes, os quais representam maior escala dos produtos cartográficos. Além disso, o número de pontos de checagem adotado na análise de exatidão é muito variável, o que certamente interfere nas análises estatísticas.

7.6 Verificação da Exatidão do MDT_{RPAS} com referência em MDT_{controle}

Como relatado em 6.4, um MDT da área de estudo da UHE Álvaro de Souza Lima foi produzido a partir do levantamento topográfico trigonométrico com estação total Leica TCR-407, processado no QGIS 2.14, essencialmente com malha regular de 1 m com interpolador TIN. Esse MDT foi usado como controle a fim de verificar a exatidão altimétrica do MDT gerado a partir da fotogrametria com RPAS. Para essa verificação, o MDT_{RPAS} foi reamostrado com pixel de 2,5 metros, de maneira a garantir uma precisão de 2,5 x maior do que o MDT_{controle}.

As análises estatísticas sobre o MDT_{RPAS} parte do pressuposto de que a exatidão do MDT_{RPAS} é medida pela exatidão horizontal EN, por meio de pontos homólogos e exatidão vertical h a partir de pontos virtuais extraídos sobre uma malha sobreposta simultaneamente no MDT controle e RPAS.

Foram sobrepostas duas malhas sobre os MDTs, uma regular com espaçamento de 30 metros e outra aleatória de 100 pontos com 100 repetições, e realizadas as análises como apresentado na seção 5.4. A seguir, são apresentados os resultados conseguidos por esse

método e comparado com os resultados das análises dos testes de exatidão por pontos homólogos.

7.6.1 Verificação da Exatidão por Meio de Pontos Amostrados em Malha Regular

A malha de pontos 30 x 30 metros aplicada nos MDTs de controle e teste é mostrada na Figura 38. Foram extraídos 103 pontos amostrais de elevação sobre os MDT_{controle} e MDT_{RPAS}. Essas elevações foram tabuladas com as coordenadas UTM 22S, SIRGAS 2000, e calculadas as discrepâncias verticais (anexo 4). Em seguida, foram excluídas as discrepâncias que superaram o limite de 3 vezes o erro estimado a priori, ou seja, 5,04 m. Apenas um ponto foi considerado *outlier*, (< 1% da amostra). Na Tabela 50, são apresentadas as medidas estatísticas descritivas do MDT_{RPAS}.

Tabela 50 - Medidas estatísticas da verificação de exatidão do MDT_{RPAS} (Canon EOS 600D + SfM)

Discrepância	Média	Mediana	Variância	Desvio padrão	RMSE	Cv
EN (m)	0,994	0,899	0,097	0,311	1,040	1,006
h (m)	0,632	0,908	1,903	1,380	1,511	2,184
MDT (m)	1,178	1,277	1,905	1,415	1,834	1,201

Figura 44 - Malha regular de amostragem de elevações sobre MDT_{controle} e MDT_{RPAS}

7.6.1.1 Verificação das Hipóteses Prévias para a Amostragem Regular sobre o MDT Canon EOS 600D + SfM

7.6.1.2 Teste de Independência das Discrepâncias (h) Verificadas por Meio de MDT de Controle

A independência das discrepâncias (h) foi verificada por meio da análise geostatística, como relatado no item 5.4.3.1. Foram construídos 5 semivariogramas para cada discrepância nas seguintes direções: 0° , -45° , 45° , 60° e 90° , com *lag* 30 metros. A espacialização dos pontos e os semivariogramas são apresentados na Figura 45.

Figura 45 - Distribuição espacial e semivariogramas das discrepâncias (h) extraídas do MDT_{RPAS}

Como pode ser visualizado na figura acima, os semivariogramas não apresentaram os elementos básicos para construção de modelos, exceto o omnidirecional (0, 0). Isto demonstra que nas direções principais, as discrepâncias nas elevações do MDT_{RPAS} não dependem da localização.

7.6.1.3 Teste de Normalidade

As hipóteses prévias estabelecidas, ao nível de significância de 0,05, para 101 graus de liberdade são apresentadas abaixo. Na Figura 46, o histograma das discrepâncias h extraídas por meio de malha regular do MDT de controle e da fotogrametria (Canon EOS 600D + SfM) com os parâmetros da função de Shapiro-Wilk.

H_0 : a distribuição das discrepâncias verticais (h) cumpre a função normal

H_1 : a distribuição das discrepâncias verticais (h) não cumpre a função normal

Figura 46 - Histograma das diferenças das discrepâncias (h) (Canon EOS + SfM) amostradas em malha regular com curva de teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e distribuição espacial dos pontos de checagem

O índice W foi igual a 0,939 e o p -valor do teste de Shapiro-Wilk igual a 0,227 ($> 0,05$). Assim, as discrepâncias verticais apresentaram uma função de distribuição normal. No entanto, o valor de $CV > 1,0$ demonstra que há uma grande dispersão dos dados. Quanto ao teste de aleatoriedade das discrepâncias verticais, não se aplica neste caso, uma vez que a amostragem se deu em malha regular.

Na Tabela 51 é apresentado um resumo das medidas estatísticas descritivas das amostras de discrepâncias EN e h e as conclusões sobre os testes de independência, normalidade e aleatoriedade.

Tabela 51 - Resumo das medidas estatísticas descritivas das discrepâncias (h) verificadas no MDT_{RPAS} e resultados dos testes de independência, normalidade e aleatoriedade

Discrepância	Média	Mediana	Desvio padrão	RMSE	Independência	Normalidade	Aleatoriedade
EN (m)	0,994	0,898	0,311	1,040	Sim	Sim	Não
h (m)	0,632	0,908	1,415	1,834	Sim	Sim	Não

Diante da constatação de normalidade pelo teste Shapiro-Wilk, teste paramétricos de inferência podem ser aplicados à média e variância das discrepâncias h observadas no MDT_{RPAS}, para análise de tendência e enquadramento no padrão de exatidão de exatidão de MDT de produtos digitais - PEC-PCD, 2011.

7.6.1.4 Testes de Inferência para a Amostragem Regular sobre MDT_{RPAS} Canon EOS 600D + SfM

Uma vez que as discrepâncias h da comparação entre o MDT_{RPAS} e MDT_{CONTROLE} apresentaram distribuição normal de acordo com a função de Shapiro-Wilk (p-valor = 0,227), testes paramétricos foram aplicados para verificar tendência em h e a exatidão do MDT_{RPAS}. Foram calculadas as estatísticas *t* do teste *t*-Student e confrontadas com a hipótese nula de que não há tendência na discrepância populacional h. Este teste, aplicado às médias das discrepâncias, indica também se há diferenças entre os métodos (RPAS+SfM e GNSS). Na Tabela 52, são apresentados os resultados do teste e a ação em relação à hipótese nula e a decisão tomada para tendência h.

Tabela 52 - Resultado do Teste *t* Student para verificação de tendência das discrepâncias (h) entre MDT_{RPAS} e MDT_{controle}

Discrepância	Estatística <i>t</i>	Valor tabelado ($t_{101, 0,05}$)	Ação	Decisão
h	4,625	1,645	Rejeita H_0	Apresenta tendência
MDT	8,409	1,645	Rejeita H_0	Apresenta tendência

O teste *t* Student aplicado às discrepâncias nas elevações do MDT_{RPAS}, em relação ao MDT_{controle}, resultaram em $|t_{cal}| > t_{(101;0,05)}$, o que permite inferir que há tendência nas discrepâncias h e do MDT. Há, ainda uma diferença entre as elevações extraídas do MDT gerado pela fotogrametria RPAS e SfM e o MDT controle oriundo do levantamento

trigonométrico, com estação total ao nível de 5% de confiança e com 101 graus de liberdade. Além disso, pode-se concluir que a comparação entre MDTs por amostragem de pontos, em malha regular, se mostrou mais restritiva que a comparação entre pontos discretos (vide Tabela 50).

7.6.1.5 Análise da Exatidão Vertical e do MDT Canon EOS 600D + SfM (Amostragem Regular)

O teste Qui quadrado foi aplicado para verificar o enquadramento da altimetria e do MDT Canon EOS 600D + SfM em relação ao PEC-PCD (2011). para as classes A, B, C e D nas escalas 1:5000 e 1:10.000. Na Tabela 53 são apresentados os valores de referência para as escalas testadas.

Tabela 53 - Valores de referência para o erro padrão (EP) de acordo com o padrão brasileiro de exatidão para altimetria e MDT de produtos digitais nas escalas 1:5000 e 1:10.000

Discrepância	Classe A (m)	Classe B (m)	Classe C (m)	Classe D (m)
h (1:5.000)	0,66	0,80	1,00	1,20
h (1:10.000)	1,67	2,00	3,00	3,50
MDT (1:5.000)	0,34	0,66	0,80	1,00
MDT (1:10.000)	0,84	1,67	2,00	2,50

Na Tabela 54, são apresentados os resultados dos testes Qui quadrado para a escala 1:5000 em relação à variância das discrepâncias da componente h, extraída sobre a malha regular. E, na Tabela 55, os resultados do mesmo teste para a escala 1:10.000.

Tabela 54 – Teste de Qui quadrado para análise de exatidão de altimetria (h) para as classes A, B, C e D, na escala 1:5.000, do PEC-PCD

1:5.000	A	B	C	D
EP-h	0,66	0,80	1,00	1,20
χ^2_{cal}	441,56	300,54	192,34	133,57
$\chi^2(101; 0,025) = 75,08$	R H ₀ ¹	R H ₀	R H ₀	R H ₀
$\chi^2(101; 0,05) = 78,81$	R H ₀	R H ₀	R H ₀	R H ₀
$\chi^2(101; 0,10) = 83,27$	R H ₀	R H ₀	R H ₀	R H ₀
RMSE _{vert} = 1,511	NA ³	NA	NA	NA

¹R H₀ – Rejeita H₀

³ O RMSE_h do MDT não atende ao padrão de exatidão para a classe testada

Tabela 55 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão altimétrica (h) para as classes A, B, C e D, na escala 1:10.000, do PEC-PCD

1:10.000	A	B	C	D
EP-h	1,67	2,00	3,00	3,50
χ^2_{cal}	68,97	48,09	21,37	15,70
$\chi^2(101; 0,025) = 75,08$	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀
$\chi^2(101; 0,05) = 78,81$	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀
$\chi^2(101; 0,10) = 83,27$	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀
RMSE _{vert} = 1,511	NA ³	A ⁴	A ⁴	A

¹R H₀ – Rejeita H₀

²NR H₀ – Não rejeita H₀

³ O RMSE_h do MDT não atende ao padrão de exatidão para a classe testada

⁴ O RMSE_h do MDT atende ao padrão de exatidão para a classe testada

A análise da exatidão da altimetria, por meio do teste Qui quadrado, e RMSE_h têm de conduzir ao mesmo resultado. Como pode ser observado nas tabelas acima, a componente (h) não se enquadrou em nenhuma das classes da escala 1:5.000, assim como, o RMSE_h foi maior que o EP em todos os casos. No entanto, enquadrou-se a partir da classe B na escala 1:10.000, com 97,5% de confiança e 101 graus de liberdade.

Nas Tabelas 56 e 57 são apresentados os resultados do teste Qui quadrado para a análise do enquadramento do MDT, no PEC-PCD (2011), nas escalas 1:5.000 e 1:10.000, considerando o desvio padrão na discrepância do MDT igual a 1,415 m e o RMSE_{MDT} igual a 1,834 m.

Tabela 56 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão do MDT_{RPAS} nas classes A, B, C e D, com escala 1:5.000, do PEC-PCD

1:5.000	A	B	C	D
EP-MDT	0,34	0,66	0,80	1,00
χ^2_{cal}	1749,35	464,24	315,98	202,22
$\chi^2(101; 0,025) = 75,08$	R H ₀	R H ₀	R H ₀	R H ₀
$\chi^2(101; 0,05) = 78,81$	R H ₀	R H ₀	R H ₀	R H ₀
$\chi^2(101; 0,10) = 83,27$	R H ₀	R H ₀	R H ₀	R H ₀
RMSE _h = 1,834	NA ³	NA	NA	NA

¹R H₀ – Rejeita H₀

²NR H₀ – Não rejeita H₀

³ A - O RMSE_{MDT} não atende ao padrão de exatidão do MDT para a classe testada

Tabela 57 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão do MDTRPAS nas classes A, B, C e D, na escala 1:10.000, do PEC-PCD

1:10.000	A	B	C	D
EP-MDT	0,84	1,67	2,00	2,50
χ^2_{cal}	286,60	72,51	50,56	32,36
$\chi^2(101; 0,025) = 75,08$	R H ₀	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀
$\chi^2(101; 0,05) = 78,81$	R H ₀	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀
$\chi^2(101; 0,10) = 83,27$	R H ₀	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀
RMSE _h = 1.834	NA ³	NA	A ⁴	A

¹R H₀ – Rejeita H₀

²NR H₀ – Não rejeita H₀

³A - O RMSE_{MDT} não atende ao padrão de exatidão do MDT para a classe testada

⁴A - O RMSE_{MDT} atende ao padrão de exatidão do MDT para a classe testada

A exatidão do MDTRPAS, verificada por meio do EP, resultou no enquadramento do PEC-PCD, a partir da classe B, da escala 1:10.000, com 97,5% de confiança e com 101 graus de liberdade. No entanto, para o teste com referência no RMSE_{MDT} o enquadramento ocorreu a partir da classe C da mesma escala. Esse critério foi mais restritivo que a comparação com a medida em relação a variância.

7.6.2 Exatidão do MDTRPAS por Meio de Amostragem Aleatória

Foram extraídos 100 pontos de elevação em 100 iterações sobre os MDT-controle e MDTRPAS amostrados de forma aleatória. Foram calculadas as discrepâncias verticais médias em cada iteração (anexo 4). E, foram excluídas as discrepâncias que superaram o limite de 5,04 m. Apenas um ponto foi considerado *outlier* (1% da amostra). Na Tabela 58 são apresentadas as medidas estatísticas EN calculadas sobre as amostras de pontos homólogos. As medidas estatísticas de (h) foram calculadas sobre os valores de (h) extraídos das 100 iterações. Já, do MDT foi obtido pela composição das duas anteriores.

Tabela 58 - Medidas estatísticas descritivas para EN, h e MDTRPAS (Canon EOS 600D + SfM) (Amostra Aleatória)

Discrepância	Média	Mediana	Variância	Desvio padrão	RMSE	Cv
EN (m) ¹	0,994	0,898	0,097	0,311	1,040	1,006
h (m)	1,209	0,774	1,696	1,302	1,433	1,077
MDT (m)	1,565	1,186	1,699	1,339	1,771	0,855

¹ Resultados obtidos por comparação entre pontos homólogos.

7.6.2.1 Verificação de Hipóteses Prévias da Componente (h) da Amostragem Aleatória sobre MDT_{RPAS} e $MDT_{Controle}$

Neste caso, a independência das discrepâncias (h), assim como, a aleatoriedade são presumidas. Na Figura 47, é apresentado o histograma das discrepâncias (h) extraídas da amostragem aleatória para o MDT_{RPAS} em relação ao MDT controle, a curva da função de distribuição de Shapiro-Wilk e um exemplo da distribuição espacial das amostras.

Figura 47 - Histograma com curva de Shapiro-Wilk e um exemplo de espacialização para as discrepâncias (h) observadas na amostragem aleatória sobre o MDT_{RPAS} em relação ao $MDT_{controle}$

O teste de normalidade aplicado às médias das discrepâncias da componente (h) dos 100 conjuntos resultou em p-valor igual a 0,561 ($> 0,05$), na função de distribuição de Shapiro-Wilk, o que demonstra que a amostra cumpre a função de distribuição normal. E desta forma, testes paramétricos podem ser aplicados para inferência dos resultados quanto à tendência e enquadramento da exatidão altimétrica e do MDT_{RPAS} .

7.6.2.2 Testes de Inferência para a Amostragem Aleatória sobre MDT_{RPAS} Canon EOS 600D + SfM

Na Tabela 59 são apresentados os resultados dos testes t Student para (h) e para o

MDT Canon EOS 600D para as discrepâncias amostradas aleatoriamente.

Tabela 59 - Teste t Student para verificação de tendência das discrepâncias (h) e MDT_{RPAS}

Discrepância	Estatística t	Valor tabelado ($t_{98;0,05}$)	Ação	Decisão
h	9,286	1,660	Rejeita H_0	Apresenta tendência
MDT	11,693	1,660	Rejeita H_0	Apresenta tendência

O teste t Student aplicado às discrepâncias médias das elevações do MDT_{RPAS} em relação ao MDT_{controle} resultaram em $t_{cal}/ > t_{(98;0,05)}$, o que permite inferir que há tendência nas discrepâncias (h) e do MDT,. E, ainda, há diferença entre as elevações extraídas do MDT gerado pela fotogrametria RPAS e SfM e o MDT controle, oriundo do levantamento trigonométrico com estação total, ao nível de 5% de confiança e com 98 graus de liberdade. Pode-se concluir, através destes resultados, que a comparação entre MDTs por amostragem aleatória de pontos se mostrou mais restritiva que a comparação da verificação por pontos discretos (vide Tabela 50).

7.6.2.3 Análise da Exatidão Vertical e do MDT Canon EOS 600D + SfM (Amostragem Aleatória)

Nas Tabelas 60 e 61, são apresentados os resultados do teste Qui quadrado para a verificação da exatidão altimétrica do MDT_{RPAS} para as escalas 1:5000 e 1:10.000 e classes estabelecidas no PEC-PCD (2011).

Tabela 60 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão da altimetria (h) do MDT_{RPAS} para as classes A, B, C e D, na escala 1:5.000, do PEC-PCD

1:5.000	A	B	C	D
EP-h	0,66	0,80	1,00	1,20
χ^2_{cal}	393,06	267,52	171,22	118,90
$\chi^2(98; 0,025) = 72,50$	R H_0 ¹	R H_0	R H_0	R H_0
$\chi^2(98; 0,05) = 76,16$	R H_0	R H_0	R H_0	R H_0
$\chi^2(98; 0,10) = 80,54$	R H_0	R H_0	R H_0	R H_0
RMSE _h = 1,433 m	NA ³	NA	NA	NA

¹R H_0 – Rejeita H_0

³ O RMSE_h do MDT não atende ao padrão de exatidão para a classe testada

Tabela 61 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão altimétrica (h) do MDT_{RPAS} para as classes A, B, C e D, na escala 1:10.000, do PEC-PCD

1:10.000	A	B	C	D
EP-h	1,67	2,00	3,00	3,50
χ^2_{cal}	61,39	42,80	19,02	13,98
$\chi^2(98; 0,025) = 72,50$	NR H ₀ ¹	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀
$\chi^2(98; 0,05) = 76,16$	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀
$\chi^2(98; 0,10) = 80,54$	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀
RMSE _h = 1,433 m	A ³	A	A	A

¹NR H₀ – Não rejeita H₀

³ A - O RMSE_h do MDT atende ao padrão de exatidão para a classe testada

A análise da exatidão da altimetria por meio do teste Qui quadrado e RMSE_h deve conduzir ao mesmo resultado. Conclui-se que a altimetria do MDT_{RPAS} se enquadra a partir da classe A, na escala 1:10.000, com 97,5% de confiança e com 98 graus de liberdade.

Nas Tabelas 62 e 63 são apresentados os resultados do teste Qui quadrado para a análise do enquadramento do MDT no PEC-PCD (2011), nas escalas 1:5.000 e 1:10.000,, considerando o desvio padrão na discrepância do MDT igual a 1,339 m e do RMSE_{MDT} igual a 1,771 m.

Tabela 62 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão do MDT_{RPAS} nas classes A, B, C e D, na escala 1:5.000, do PEC-PCD

1:5.000	A	B	C	D
EP-MDT	0,34	0,66	0,80	1,00
χ^2_{cal}	1519,95	403,37	274,54	175,71
$\chi^2(98; 0,025) = 72,50$	R H ₀ ¹	R H ₀	R H ₀	R H ₀
$\chi^2(98; 0,05) = 76,16$	R H ₀	R H ₀	R H ₀	R H ₀
$\chi^2(98; 0,10) = 80,54$	R H ₀	R H ₀	R H ₀	R H ₀
RMSE _h = 1,771	NA ²	NA	NA	NA

¹R H₀ – Rejeita H₀

² NA - O RMSE_{MDT} não atende ao padrão de exatidão do MDT para a classe testada

Tabela 63 - Teste Qui quadrado para análise de exatidão do MDT_{RPAS} nas classes A, B, C e D, na escala 1:10.000, do PEC-PCD

1:10.000	A	B	C	D
EP-MDT	0,84	1,67	2,00	2,50
χ^2_{cal}	249,02	63,00	43,93	28,11
$\chi^2(98; 0,025) = 72,50$	R H ₀	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀
$\chi^2(98; 0,05) = 76,16$	R H ₀	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀
$\chi^2(98; 0,10) = 80,54$	R H ₀	NR H ₀	NR H ₀	NR H ₀
RMSE _h = 1,771	NA ³	NA	A ⁴	A

¹R H₀ – Rejeita H₀

²NR H₀ – Não rejeita H₀

³ NA - O RMSE_{MDT} não atende ao padrão de exatidão do MDT para a classe testada

⁴ A - O RMSE_{MDT} atende ao padrão de exatidão do MDT para a classe testada

O teste de Qui quadrado para inferência da exatidão do MDT_{RPAS} em relação ao PEC-PCD apontou o enquadramento para a escala 1:10.000, na Classe C. Como já relatado, a análise da variância foi menos restritiva que a análise do $RMSE_{MDT}$.

Para elucidar os resultados obtidos nos testes t Student e Qui quadrado e melhorar a compreensão do processo de coleta e processamento digital de imagens, pelo método SfM, na fotogrametria com sensor embarcado em RPAS, foram traçadas 15 seções transversais, espaçadas de 30 em 30 metros, sobre os $MDT_{controle}$ e MDT_{RPAS} . Na Figura 48 é apresentada a localização das seções transversais sobre o ortomosaico e o MDT.

Figura 48 - Localização das seções transversais sobre o ortomosaico e MDT

Na Figura 49 são apresentados os perfis das seções 1 a 15, sendo a linha verde o perfil do $MDT_{controle}$ e, a linha vermelha, o perfil do MDT_{RPAS} .

Figura 49 - Seções transversais 1 a 15, representativas dos deslocamentos entre MDT_{RPAS} e $MDT_{controle}$

Continuação da Figura 49 - Seções transversais 1 a 15, representativas dos deslocamentos entre MDT_{RPAS} e $MDT_{controle}$

No perfil da seção transversal 1, o $MDT_{controle}$ ficou acima do MDT_{RPAS} e manteve um deslocamento médio de 1,0 metro. Já no perfil da seção transversal 2, o deslocamento entre o $MDT_{controle}$ foi inferior a 0,50 metros. A partir do perfil da seção transversal 3, observa-se que o MDT_{RPAS} encontra-se acima do $MDT_{controle}$, revelando um efeito de torção durante o georreferenciamento da nuvem de pontos densa.

Nos perfis das seções 2 a 6, também se percebe maior discrepância entre as elevações do MDT_{RPAS} e $MDT_{controle}$, destacadas nos círculos à direita dos gráficos. Isso deve-se ao fraco recobrimento de imagens devido a deriva do voo por ação do vento, zona de manobra da aeronave, como pode ser visualizado na Figura 21. Como relatado por Silva et al. (2015), as imagens capturadas em zonas de manobra produzem fraco recobrimento e devem ser excluídas do processamento do MDT. Assim, essas regiões dos perfis podem ser consideradas como zonas de erros grosseiros, embora não tenha sido detectado pelo teste de exclusão de pontos anômalos de $3\sigma_{priori}$.

Nos perfis das seções 7 a 10, observa-se uma semelhança na tendência do relevo nos MDTs RPAS e controle. No entanto, observam-se algumas falhas na porção à esquerda dos gráficos. Essa diferença é inferior ao desvio padrão estimado e pode ser atribuída a erros devido ao método de filtragem da nuvem densa de pontos, uma vez que, nesta porção há maior ocorrência de vegetação arbórea de maior porte. No perfil da seção 11, observa-se uma falha de interpolação durante o processamento do $MDT_{controle}$.

Nos perfis das seções 12 a 15, o deslocamento médio é em torno de 1,00 metro. Neste local há maior cobertura de árvores e foi adensada a coleta de pontos topográficos com a estação total para geração do $MDT_{controle}$, o qual revela que com maior número de pontos é possível detectar sistematismos entre os dois modelos.

8. CONCLUSÕES

A aerofotogrametria com RPAS é uma técnica de baixo custo para produção de mapas com alta resolução espacial e temporal. No entanto, a diversidade de equipamentos, sensores, metodologias de coleta e processamento de dados requer uma análise sistemática, a fim de garantir que os produtos possam ser usados para geração e atualização de informações cartográficas demandadas pelos órgãos gestores de energia elétrica.

Neste trabalho, preocupou-se com a análise estatística da exatidão geométrica de ortomosaicos e MDTs gerados a partir de imagens coletadas através de dois tipos de sensores RGB (Canon EOS 600D e Canon ELPH 110 S) e um sensor hiperespectral (Sequóia), processados pelo método SfM. Para tal, foram utilizados: um RPAS de Asa Fixa e um hexacóptero. Na comparação com pontos de controle coletados com GNSS diferencial RTK, todos os produtos apresentaram exatidão suficiente para atendimento dos padrões de exatidão brasileiro.

Os testes aplicados para verificação das hipóteses prévias foram capazes de identificar a independência, a normalidade e aleatoriedade dos dados. O teste de Shapiro-Wilk foi eficiente para detectar a normalidade dos dados amostrais. As medidas estatísticas demonstraram que há uma tendência do erro ser maior na posição vertical.

O teste t Student demonstrou tendência para a posição EN do ortomosaico Canon EOS 600 D + SfM e para a componente h não foi verificada tendência. Assim, o teste direcional de von Mises indicou que a tendência horizontal ocorreu na direção sudoeste com 247,060 graus, com discrepância média de 0,596 metros e desvio padrão de 1,05 metros.

O ortomosaico obtido através da câmera Canon EOS 600 D + SfM, quando confrontado com o padrão de exatidão brasileiro, enquadrou-se na classe B da escala 1:2000 para produtos da cartografia digital (PEC-PCD). No entanto, na análise do MDT, observou-se que tanto a exatidão vertical (h) quanto o MDT, enquadraram esses produtos na classe C da escala 1:10.000. A exigência legal é para esta escala, porém, para a classe B.

Os testes realizados por meio de MDT de controle mostraram que embora com maior grau de liberdade, os resultados foram semelhantes aos conseguidos por meio de pontos de controle discretos, com a vantagem de facilitar a visualização de sistematismos na componente vertical.

Os testes aplicados aos produtos gerados através das imagens dos sensores Canon

ELPH 110 S e Sequoia, embarcados em hexarotor, apresentaram melhores resultados que os conseguidos através do sensor Canon EOS 600D embarcado em um RPA de asa fixa. Não se pode concluir que a diferença se deve aos equipamentos e, sim, a metodologia de coleta de dados, uma vez que, o voo no primeiro caso foi executado a 120 metros do solo e no segundo caso, a 380 metros do solo. Desta forma, pode-se afirmar que a altitude influencia diretamente na qualidade da componente vertical.

As discrepâncias EN e h dos produtos cartográficos obtidos através dos sensores Canon ELPH 110 S + SfM e Sequóia +SfM, cumpriram as hipóteses prévias de independência verificadas na análise de semivariogramas e de aleatoriedade pelo teste de sequências com base na mediana. Porém, não cumpriram a função de distribuição normal, de acordo com o teste de Shapiro-Wilk. Assim, o teste U de Mann-Whitney foi aplicado nos pontos de controle dos dois sensores e demonstrou que para Sequóia + SfM não há diferenças significativas dos dados extraídos do MDT em relação ao GNSS diferencial RTK a um nível de confiança de 95%. Porém, isto não se confirmou para o MDT oriundo através da câmera Canon ELPH 110S+SfM.

Para os casos estudados, conclui-se que produtos cartográficos gerados a partir da fotogrametria com RPAS + SfM apresentam exatidão geométrica suficiente para atendimento das exigências legais previstas para elaboração de plantas cadastrais para solicitação de áreas de concessão e servidão, necessárias à implantação de equipamentos para geração de energia elétrica. Além disso, este trabalho demonstra a importância de se adotar um protocolo de verificação de exatidão posicional para produtos da fotogrametria com RPAS, a fim de possibilitar a comparação entre produtos originados por diferentes sensores, aeronaves, altitude de vôo e métodos de processamento. Isto também colabora para a integração de dados obtidos por esta técnica para atualização de informações cadastrais oriundas de outras técnicas, como levantamentos fotogramétricos convencionais e levantamentos topográficos, uma vez que os resultados foram semelhantes aos conseguidos com aerofotogrametria aérea convencional e orbital.

9. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho demonstrou o grande potencial da aplicação da fotogrametria por meio de RPAS, porém não esgotou todas as possibilidades de análises. Assim, recomenda-se que novas pesquisas possam ser realizadas para validação dos produtos cartográficos através desta técnica, abrangendo os seguintes temas:

(1) Análise de consistência lógica de MDE em função do sensor de coleta de imagens e dos métodos de processamento, pois foi observado neste trabalho que o MDE apresenta falhas, principalmente, em áreas homogêneas como em superfícies líquidas de grande extensão e áreas com cobertura contínua de vegetação.

(2) Avaliação da exatidão geométrica com georreferenciamento direto. Já é uma realidade RPAS dotados de GNSS diferencial RTK ou RTX. Supõe-se que os produtos gerados com as imagens coletadas com esses sistemas apresentem exatidão suficiente para mapeamentos cartográficos.

(3) Aprofundamento nos testes estatísticos para análise de dados que não apresentem a distribuição normal. Neste trabalho, foi aplicado o teste U de Mann-Whitney, cuja análise é semelhante ao teste t Student para dados pareados. No entanto, não houve conclusão com relação a testes que conduzissem ao enquadramento em escala da exatidão dos produtos gerados pela aerofotogrametria com RPA.

(4) Aplicação da estatística direcional aplicada à análise de tendência das discrepâncias 3D.

(5) Avaliação de feições lineares através da análise de exatidão por meio de MDT de controle.

10. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA -. **Orientações para atualização das curvas cota x área x volume** Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica - SGH, , Dezembro de 2013. Acesso em: 20 maio. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - ANAC. Resolução nº 419, de 2 de maio de 2017. REQUISITOS GERAIS PARA AERONAVES NÃO TRIPULADAS DE USO CIVIL. . 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 501, DE 24 DE JULHO DE 2012. Estabelece os procedimentos para o mapeamento dos bens imóveis e das áreas vinculados à concessão de usinas hidrelétricas. 2012.

_____. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 740, DE 11 DE OUTUBRO DE 2016. Estabelece os procedimentos gerais para requerimento de Declaração de Utilidade Pública – DUP, de áreas de terra necessárias à implantação de instalações de geração e de Transporte de Energia Elétrica, por concessionários, permissionários e autorizados e dá outras providências. 2016.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS ANA. RESOLUÇÃO CONJUNTA Nº 3. DE 10 DE AGOSTO DE 2010. Estabelecer as condições e os procedimentos a serem observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos hidrelétricos, e dar outras providências. 2010.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI. NCITS 320-1998. Spatial data transfer standard – SDTS. Part 1: Logical specifications. Washington, D. C. USA. . 1998.

ARIZA LÓPEZ, F. J. **CALIDAD EN LA PRODUCCIÓN CARTOGRÁFICA. - RA-MA.** Disponível em: <<http://www.ra-ma.es/libros/CALIDAD-EN-LA-PRODUCCION-CARTOGRAFICA/82/978-84-7897-524-2>>. Acesso em: 19 maio. 2017.

ARIZA LÓPEZ, F. J.; ATKINSON GORDO, A. D. Analysis of Some Positional Accuracy Assessment Methodologies. **Journal of Surveying Engineering**, v. 134, n. 2, p. 45–54, maio 2008.

ARIZA-LÓPEZ, F. J.; MOZAS-CALVACHE, A. T.; UREÑA-CÁMARA, M. A.; ALBA-FERNÁNDEZ, V.; GARCÍA-BALBOA, J. L.; RODRÍGUEZ-AVI, J.; RUIZ-LENDÍNEZ, J. J. Influence of sample size on line-based positional assessment methods for road data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 5, p. 708–719, set. 2011.

AMERICAN SOCIETY PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING - ASPRS. Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 81, n. 3, p. A1–A26, 1 mar. 2015.

ATKINSON GORDO, A. D. J. **Control de Calidad Posicional en Cartografía: Análisis de los principales estándares y propuesta de mejora**. 2005. Universidad de Jaén, Jaén - Espanha, 2005.

BAKULA, K.; SALACH, A.; WZIĄTEK, D. Z.; OSTROWSKI, W.; GÓRSKI, K.; KURCZYŃSKI, Z. Evaluation of the accuracy of lidar data acquired using a UAS for levee monitoring: preliminary results. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 8–10, p. 2921–2937, 19 maio 2017.

BARBETA, P. A. **Estatística Aplicada a Ciências Sociais**. Florianópolis, SC: Ed. da UFSC, 2012.

BENASSI, F.; DALL’ASTA, E.; DIOTRI, F.; FORLANI, G.; MORRA DI CELLA, U.; RONCELLA, R.; SANTISE, M. Testing Accuracy and Repeatability of UAV Blocks Oriented with GNSS-Supported Aerial Triangulation. **Remote Sensing**, v. 9, n. 2, p. 172, 18 fev. 2017.

BOLFARINE, H.; BUSSAB, W. O. **Elementos de Amostragem**. Instituto de Matemática e Estatística - Universidade de São Paulo, 2004. .

BRASIL. Dispõe sobre aerolevantamentos no território nacional e dá outras providências. 21 de Junho de 1971. . 1971.

BRASIL. Decreto Nº 89.817 DE 20 DE JUNHO DE 1984 – Normas Técnicas da Cartografia Nacional. 1984.

BRASIL. 8987. LEI Nº 8.987, DE 13 DE FEVEREIRO DE 1995. Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências. . 1995 a. .

BRASIL. LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. . 1997.

BRASIL. Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita de 7 de Julho de 2008. . 2008.

BRASIL. Lei Federal 12334 de 20 de Setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000.

BRASIL. LEI Nº 12.651, DE 25 DE MAIO DE 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. 2012.

BRASIL. Lista de Verificação e Orientações para Elaboração e Publicação de Circulares de Informação Aeronáutica. de Setembro de 2016.

BRIGHENTI, C. R. G.; BRIGHENTI, D. M.; MIRANDA, Y. S. S.; OLIVEIRA, T. G. S. DISTRIBUIÇÃO VON MISES NA AVALIAÇÃO DE DADOS APÍCOLAS. **Arch. Zootec.**, v. 63, n. 243, p. 461–471, 2014.

BROWN, M.; LOWE, D. Invariant Features from Interest Point Groups. In: Proceedings of the, **Anais...** In: BRITISH MACHINE CONFERENCE - BMVC. 2002.

BRUIN, S. de; BREGT, A.; VEN, M. van de. Assessing fitness for use: the expected value of spatial data sets. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 15, n. 5, p. 457–471, 1 jul. 2001.

CELESTINO, V. S.; ROCHA, R. S. Avaliação do padrão de exatidão cartográfico – pec brasileiro em produtos gerados a partir de imagem. **Anais...** In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO. Recife, PE, Brasil: 08 a 11 de setembro de 2011.

CHEN, Y.; HAKALA, T.; KARJALAINEN, M.; FENG, Z.; TANG, J.; LITKEY, P.; KUKKO, A.; JAAKKOLA, A.; HYYPPÄ, J. UAV-Borne Profiling Radar for Forest Research. **Remote Sensing**, v. 9, n. 1, p. 58, 10 jan. 2017.

CHI, Y.-Y.; YA-FEN, L.; SHANG-EN, T. Study on High Accuracy Topographic Mapping via UAV-based Images. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 44, n. 3, p. 032006, 2016.

CINTRA, J. P.; NERO, M. A. Metodologia para o controle de qualidade de mapeamentos sistemáticos em meio digital. In: Anais, Macaé, RJ. **Anais...** In: CARTOGRAFIA COMO INSTRUMENTO PAR O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. Macaé, RJ: 2005.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 92, p. 79–97, jun. 2014.

CONSOLI, S.; MATARAZZO, B.; PAPPALARDO, N. Operating Rules of an Irrigation Purposes Reservoir Using Multi-Objective Optimization. **Water Resour Manage**, 2008.

CORSI, C.; SLAPŠAK, B.; VERMEULEN, F. **Good Practice in Archaeological Diagnostics: Non-invasive Survey of Complex Archaeological Sites**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2013.

COVENEY, S.; ROBERTS, K. Lightweight UAV digital elevation models and orthoimagery for environmental applications: data accuracy evaluation and potential for river flood risk modelling. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 8–10, p. 3159–3180, 19 maio 2017.

CROMMELINCK, S.; BENNETT, R.; GERKE, M.; YANG, M. Y.; VOSSELMAN, G. Contour Detection for UAV-Based Cadastral Mapping. **Remote Sensing**, v. 9, n. 2, p. 171, 18 fev. 2017.

CUNHA, A. A.; DIAS, J. H.; ALIXANDRINI JUNIOR, M. J.; ELIAS, E. N. N. Controle de qualidade posicional de ortofoto gerada pelo RPA (remotely piloted aircraft) phantom 3 com receptor GNSS embarcado. In: Anais, Florianópolis, SC. **Anais...** In: COBRAC 2016. Florianópolis, SC: 2016.

DEBESE, N.; SEUBE, N.; HEYDEL, L. Qualitative and Quantitative Description of Multibeam Echosounder Systematic Errors on Rocky Areas. **Marine Geodesy**, v. 35, n. 3, p. 306–321, 1 jul. 2012.

DEBEVEC, P. E.; TAYLOR, C. J.; MALIK, J. **Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A hybrid geometry- and image-based approach**. Disponível em: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:q4_yJWu7-vAJ:inst.cs.berkeley.edu/~cs283/fa10/lectures/debevec-siggraph96-paper.pdf+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>. Acesso em: 20 maio. 2017.

DOMINGO, A. M. **Aplicación de las Técnicas de Estimación Robusta en algunos problemas fotogramétricos: I: Detección de Errores en el Proceso de Orientación Relativa Analítica**. Universidad Politécnica de Madrid, 2000a. .

DOMINGO, A. M. **Aplicación de las Técnicas de Estimación Robusta en algunos problemas fotogramétricos: III: Detección de Errores en el Proceso de la Formación de la Banda mediante el método de los Modelos Independientes**. Universidad Politécnica de Madrid, 2000b. .

EISENBEISS, H. **UAV Photogrammetry**. 2009. University of Technology Dresden., Suíça, 2009. Disponível em: <<http://webcache.googleusercontent.com/>> Acesso em: 20 maio. 2017.

ESTIGONI, M. V.; MATOS, A. J. S.; MAUAD, F. F. Análise da orientação da ana para a atualização das curvas cota - área - volume de reservatórios. In: X Encontro Nacional de Engenharia Sanitária, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR, Brasil:03 a 07 de dezembro de 2012.

EVERAERTS, J. The use of unmanned aerial vehicles (uavs) for remote sensing and mapping. **Anais...** In: the International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. Beijing: 2008.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY - FEMA-. **Guidelines and Standards for Flood Risk Analysis and Mapping (9) | FEMA.gov**, 2003. Disponível em: <<https://www.fema.gov/media-library/resources-documents/collections/361>>. Acesso em: 20 maio. 2017.

FERREIRA, A. M. ; 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 especial. In: Anais..., Foz do Iguaçu, PR, Brasil. **Anais...** In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. Foz do Iguaçu, PR, Brasil: INPE, a 18 de abril de 2013.

FEDERAL GEOGRAPHIC DATA COMMITTEE - FGDC. Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy. . 1998.

FISHER, N. I. **Statistical Analysis Of Circular Data**. UK: Cambridge University Press, 1993.

FLYNN, K.; CHAPRA, S. Remote Sensing of Submerged Aquatic Vegetation in a Shallow Non-Turbid River Using an Unmanned Aerial Vehicle. **Remote Sensing**, v. 6, n. 12, p. 12815–12836, 22 dez. 2014.

FONSECA NETO, F. de D. et al. Assessment of positional quality in spatial data generated by VANT using point and linear feature for cadastre applications. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 1, p. 134–149, mar. 2017.

FONSTAD, M. A. et al.. Topographic Structure from Motion: A New Development in Photogrammetric Measurement. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, n. 4, p. 421–430, 30 mar. 2013.

FUNDAÇÃO PARA O INCREMENTO DA PESQUISA E DO APERFEIÇOAMENTO INDUSTRIAL - FIPAI **Desenvolvimento, validação e aplicação de um modelo tridimensional de transporte de sedimentos em reservatórios aplicado ao cálculo e elaboração de projeções futuras de geração hidrelétrica**. 2015.

GALO, M.; CAMARGO, P. O. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. In: Anais, Florianópolis, SC. **Anais...** In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Florianópolis, SC: 2002.

GARCÍA, J. L. L. **Fotogrametría moderna: analítica y digital**. Universidad Politécnica, 2002.

GERTLER, J. **U.S. Unmanned Aerial Systems**: CRS Report for Congress. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://webcache.googleusercontent.com/>>. Acesso em: 22 maio. 2017.

GIL DE LA VEGA, P.; ARIZA-LÓPEZ, F. J.; MOZAS-CALVACHE, A. T. Models for positional accuracy assessment of linear features: 2D and 3D cases. **Survey Review**, p. 14, 2016.

GINDRAUX, S.; BOESCH, R.; FARINOTTI, D. Accuracy Assessment of Digital Surface Models from Unmanned Aerial Vehicles' Imagery on Glaciers. **Remote Sensing**, v. 9, n. 2, p. 186, 22 fev. 2017.

GÓMEZ-CANDÓN, D.; CASTRO, A. I. D.; LÓPEZ-GRANADOS, F. Assessing the Accuracy of Mosaics from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery for Precision Agriculture Purposes in Wheat. **Precision Agriculture**, v. 15, n. 1, p. 44–56, 1 fev. 2014.

GUIMARÃES, T. T.; VERONEZ, M. R.; KOSTE, E. C.; GONZAGA, L.; BORDIN, F.; INOCENCIO, L. C.; LAROCCA, A. P. C.; DE OLIVEIRA, M. Z.; VITTI, D. C.; MAUAD, F. F. An Alternative Method of Spatial Autocorrelation for Chlorophyll Detection in Water Bodies Using Remote Sensing. **Sustainability**, v. 9, n. 3, p. 416, 10 mar. 2017.

HAMPEL, F. R. The Breakdown Points of the Mean Combined with Some Rejection Rules. **Technometrics**, v. 27, n. 2, p. 95–107, 1985.

HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. **Multiple View Geometry in Computer Vision**. 2. ed. [s.l.] Cambridge, 2003. v. 1

HARWIN, S.; LUCIEER, A. Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. **Remote Sensing**, v. 4, n. 12, p. 1573–1599, 30 maio 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO.-. **ISO 19114:2003 - Geographic information -- Quality evaluation procedures**, 2003. . Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/26019.html>>. Acesso em: 20 maio. 2017.

_____. **ISO 19113:2002 - Geographic information -- Quality principles**, 2002. . Disponível em: <<https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:79KldUSAny0J:https://www.iso.org/standard/26018.html+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>>. Acesso em: 20 maio. 2017.

JAKOBSSON, A.; VAUGLIN, F. Status of Data Quality in European National Mapping Agencies. In: Proceedings, Beijing, China. **Anais...** In: THE 20TH INTERNATIONAL CARTOGRAPHIC CONFERENCE. Beijing, China: ICC, 2001.

JAMMALAMADAKA, S. R.; SENGUPTA, A. **Topics in Circular Statistics**. River Edge, N. J.: World Scientific, 2001. v. 5

JAUD, M.; PASSOT, S.; LE BIVIC, R.; DELACOURT, C.; GRANDJEAN, P.; LE DANTEC, N. Assessing the Accuracy of High Resolution Digital Surface Models Computed by PhotoScan® and MicMac® in Sub-Optimal Survey Conditions. **Remote Sensing**, v. 8, n. 6, p. 465, 1 jun. 2016.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente uma Perspectiva Em Recursos Terrestre - Lemos Prado**. Parêntese, 2011.

JEONG, Y. et al. Pushing the Envelope of Modern Methods for Bundle Adjustment. **IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence**, v. 34, n. 8, p. 1605–1617, ago. 2012.

JIANG, S.; JIANG, W.; HUANG, W.; YANG, L. UAV-Based Oblique Photogrammetry for Outdoor Data Acquisition and Offsite Visual Inspection of Transmission Line. **Remote Sensing**, v. 9, n. 3, p. 278, 16 mar. 2017.

JOHNSON, M. R.; ANDERSEN, M. J.; SEBREE, S. K. **Hydrographic Surveys for Six Water Bodies in Eastern Nebraska, 2005–07**. [s.l.] USGS, 2008. . Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/sir/2008/5048/>>. Acesso em: 20 maio. 2017.

KHAN, M. A. et al. UAV-Based Traffic Analysis: A Universal Guiding Framework Based on Literature Survey. **Transportation Research Procedia**, p. 10, 7 de Setembro de 2016.

KREK, A.; FRANK, A. U. The Economic Value of Geo Information. **Geo-Information-Systeme - Journal for Spatial Information and Decision Making**, v. 13, n. 3, p. 10–12, 2000.

KRUG, L. A.; NOEMBERG, M. A. Extração de batimetria por sensoriamento remoto de áreas rasas dos sistemas estuarinos do Estado do Paraná - Brasil. Lilian. In: *Anais...*, Goiania. **Anais...** In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiania: INPE, 2005.

KRUIJFF, G. J. M. et al. Designing, Developing, and Deploying Systems to Support Human–robot Teams in Disaster Response. **Advanced Robotics**, v. 28, n. 23, p. 1547–1570, 2 dez. 2014.

LALIBERTE, A. S. et. al. Acquisition, Orthorectification, and Object-based Classification of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imager y for Rangeland Monitoring. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, p. 661–672, jun. 2010.

LAMBERS, K. et al. Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru. **Journal of Archaeological Science**, p. 1–11, 2007.

LANGHAMMER, J.; LENDZIOCH, T.; MIŘIJOVSKÝ, J.; HARTVICH, F. UAV-Based Optical Granulometry as Tool for Detecting Changes in Structure of Flood Depositions. **Remote Sensing**, v. 9, n. 3, p. 240, 7 mar. 2017.

LOPES, M. F. A. A. **Aplicação de VANT em estudos geomorfológicos dos litorais rochosos: o exemplo de S. Paio, Vila do Conde**. 2015. Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto, 2015.

LOWE, D. G. Object Recognition from Local Scale-Invariant Features 1. Introduction. In: Proc., Corfu, Grecia. **Anais...** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION. Corfu, Grecia: 1999.

LUO, X.; WU, Y.; HUANG, Y.; ZHANG, J. Vehicle Flow Detection in Real-Time Airborne Traffic Surveillance System. **Transactions of the Institute of Measurement and Control**, v. 33, n. 7, p. 880–897, 1 out. 2011.

MANCINI, F. et al. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. **Remote Sensing**, v. 5, n. 12, p. 6880–6898, 9 dez. 2013.

MANN, P. S. **Introdução à Estatística. Tradução: Eduardo Benedito Curtulo, Teresa Cristina Padilha de Souza**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

MARDIA, K. V.; JUPP, P. E. **Directional Statistics**. London: John Wiley & Sons LTD., 2000.

MATOS, A. J. S. **Melhorias qualitativas na modelagem de levantamentos batimétricos em reservatórios por meio da ferramenta computacional "CAV-NH"**. 2012. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo., São Carlos, SP, 2012.

MERCHANT, D. C. Spatial accuracy standards for large scale line maps. In: Technical Papers, **Anais...** In: American Congress on Surveying and Mapping. 1982.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS – 2ª edição - Fundação Editora Unesp**. 2.

ed. [s.l.] UNESP, 2008.

MOREELS, P.; PERONA, P. Evaluation of Features Detectors and Descriptors Based on 3D Objects. **International Journal of Computer Vision**, v. 73, n. 3, p. 263–284, 1 jul. 2007.

MUMBONE, M. **Inovations in Boundary Mapping: Namíbia, customary land and UAV's**. 2015. University of Twente, Twente, Africa do Sul, 2015. . Acesso em: 23 mar. 2017.

MUNARETTO, L. **VANTS E DRONES. A aeronáutica ao alcance de todos**. [s.l: s.n.]

NDEP, N. D. E. P. **Guidelines for Digital Elevation Data**, 2004. .

NEITZEL, F.; KLONOWSKI, J. Mobile 3d mapping with a low-cost uav system. In: ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **Anais...** In: International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-G) (volume xxxviii-1/c22) -

NEX, F.; REMONDINO, F. UAV for 3D Mapping Applications: A Review. **Applied Geomatics**, v. 6, n. 1, p. 1–15, 1 mar. 2014.

NI, K.; STEEDLY, D.; DELLAERT, F. Out-of-Core Bundle Adjustment for Large-Scale 3D Reconstruction. In: 2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision, **Anais...** In: 2007 IEEE 11TH International Conference on Computer Vision. out. 2007.

NOGUEIRA JÚNIOR, J. B.; MONICO, J. F. G.; TACHIBANA, V. M. Tamanho da amostra no controle de qualidade posicional de dados cartográficos. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 10, n. 1, 2004. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/1462>>. Acesso em: 20 maio. 2017.

OLIVEIRA, M. Image-Based Modeling and Rendering Techniques: A Survey. **RITA**, v. IX, n. 2, p. 37–66, 2002.

OTIENO, B. S. **An alternative estimate of preferred direction for circular data**. 2002. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2002.

PEREIRA, T. A. J.; NERO, M. A. Controle de qualidade posicional de imagem quickbird ortorretificada no spring de acordo com o PEC-PCD. In: Anais..., Recife, PE, Brasil. **Anais...** In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. Recife, PE, Brasil: INPE, 06 a 09 de Maio de 2012.

R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Viena, Austria: R Foundation for Statistical Computing. ISBN: 3-900051-07-0. Available online at <http://www.R-project.org/>.

RAMOS, A. M.; LEANDRO, D.; HUINCA, S. M.; KRUEGER, C. P. Análise da exatidão horizontal do posicionamento GPS diferencial empregado em levantamentos hidrográficos a partir de sistemas DGPS. In: Anais..., Presidente Prudente. **Anais...** In: Simpósio Brasileiro de Geomática. Presidente Prudente: 24 jul. 2007.

REHAK, M.; MABILLARD, R.; SKALOUD, J. A MICRO-UAV WITH THE CAPABILITY OF DIRECT GEOREFERENCING. In: International Archives, Rostock, Germany. **Anais...** In: Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Rostock, Germany: 6 de Setembro de 2013.

REMONDINO, F.; BARAZZETTI, L.; NEX, F.; SCAIONI, M.; SARAZZI, D. UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling – current status and future perspectives –. In: International Archives, Zurich, Suíça. **Anais...** In: Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Zurich, Suíça: ISPRS, 16 Setembro 2011.

RIEKE-ZAPP, D. H.; NEARING, M. A. Digital close range photogrammetry for Measurement of soil erosion. **The Photogrammetric Record** 20 (109). 2005. pp. 69–87

ROCHA, R. S. **Exatidão cartográfica para as cartas digitais urbanas**. 2002. Universidade Federal de Santa Catarina., Florianópolis, 2002.

RODRÍGUEZ-PÉREZ, J. R.; ÁLVAREZ, M. F.; SANZ-ABLANEDO, E. Assessment of Low-Cost GPS Receiver Accuracy and Precision in Forest Environments. **Journal of Surveying Engineering**, v. 133, n. 4, p. 159–167, 2007.

RUIZ-LENDÍNEZ, J. J.; ARIZA-LÓPEZ, F. J.; UREÑA-CÁMARA, M. A. Automatic positional accuracy assessment of geospatial databases using line-based methods. **Survey Review**, v. 45, n. 332, p. 332–342, 1 set. 2013.

SANTOS, A. D. P. D.; MEDEIROS, N. D. G.; SANTOS, G. R. D.; RODRIGUES, D. D. Controle de qualidade posicional em dados espaciais utilizando feições lineares. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 2, 30 jun. 2015. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/41939>>. Acesso em: 26 maio. 2017.

SANTOS, A. G.; SEGANTINE, P. C. L.; SILVA, I. Controle de qualidade de mapas digitais urbanos para uso em sistemas de informações geográficas. **Pesquisa e Tecnologia Minerva**, v. 5, n. 2, p. 169–176, 2007.

SANTOS, A. P. **Controle de qualidade cartográfica: metodologias para avaliação da exatidão posicional em dados espaciais**. 2015. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

SILVA, W. F. et al. Avaliação de uso de Veículo Aéreo Não Tripulado - VANT em atividades de fiscalização da Agência Nacional de Águas Wagne. In: Anais..., João Pessoa, PB, Brasil. **Anais...** In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. SBSR. João Pessoa, PB, Brasil: INPE, 26 a 29 de abril de 2015.

SNAVELY, N.; SEITZ, S. M.; SZELISKI, R. Modeling the World from Internet Photo Collections. **International Journal of Computer Vision**, v. 80, n. 2, p. 189–210, nov. 2008.

SOARES, A. **Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente**. 1. ed. Lisboa, Portugal.: IS PressT, 2000. v. 1

SUGIURA, R.; NOGUCHI, N.; ISHII, K. Correction of Low-altitude Thermal Images applied

to estimating Soil Water Status. **Biosystems Engineering**, v. 96, n. 3, p. 301–313, mar. 2007.

SUN, M.; WONG, D. W. S. Incorporating Data Quality Information in Mapping American Community Survey Data. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 37, n. 4, p. 285–299, 1 jan. 2010.

SZELISKI, R. **Computer Vision: Algorithms and Applications**. Washington DC, EUA: Springer, 2010. v. 1

TORMAN, V. B. L.; COSTER, R.; RIBOLDI, J. Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação Normalit. **Rev. HCPA**, v. 32, n. 2, p. 227–234, 2012.

TORRES-SÁNCHEZ, J.; LÓPEZ-GRANADOS, F.; PEÑA, J. M. An automatic object-based method for optimal thresholding in UAV images: Application for vegetation detection in herbaceous crops. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 114, p. 43–52, jun. 2015.

TRIGGS, B.; MCLAUCHLAN, P.; HARTLEY, R.; FITZGIBBON, A. **Bundle Adjustment — A Modern Synthesis - Vision Algorithms: Theory & Practice**. [s.l.] A. Zisserman & R. Szeliski (Eds.), Springer-Verlag LNCS 1883, 2000.

UDIN, W. S.; AHMAD, A. Assessment of Photogrammetric Mapping Accuracy Based on Variation Flying Altitude Using Unmanned Aerial Vehicle. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 18, n. 1, p. 012027, 2014.

United States Army Corps Engineer - USACE. **Engineering and Design: Hydrologic Engineering Requirements For Reservoirs. EM- 1110-2-1420**, 1997. .

United States Geology Service. **Digital Line Graphs (DLGs)**. Disponível em: <http://www.ctre.iastate.edu/Research/bts_wb/cd-rom/spatial/dlg.htm>. Acesso em: 20 maio. 2017.

_____. **Standards for digital elevation models: Part 3: Quality control, standards for digital elevation models**, 1997.

VEREGIN, H.; HUNTER, G. Unit 100 - Data Quality Measurement and Assessment. **eScholarship**, 1 jan. 2000. Disponível em: <<http://escholarship.org/uc/item/2p0262jp>>. Acesso em: 20 maio. 2017.

VERHOEVEN, G. J. J. Drones: een nieuwe kijk op archeologische luchtfotografie. **Archeobrief. Vakblad voor de Nederlandse archeologie**, 2013. Disponível em: <https://www.academia.edu/29790547/Drones_een_nieuwe_kijk_op_archeologische_luchtfotografie>. Acesso em: 22 maio. 2017.

VERHOEVEN, G.; SEVARA, C.; KAREL, W.; RESSL, C.; DONEUS, M.; BRIESE, C. Undistorting the Past: New Techniques for Orthorectification of Archaeological Aerial Frame Imagery. **Natural Science in Archaeology**, p. 31–67, 2013.

VIEIRA, H. B. G.; GENRO, R. S. Inferência estatística para validação de documentos cartográficos obtidos com sensores remotos orbitais ou aerotransportados, em áreas de

operação da Petrobras. In: Anais, Curitiba. **Anais...** In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. Curitiba: INPE, 30 de abril a 05 de maio de 2011.

VITTI, D. M. C.; SANTOS, F. M.; SANTOS, B. B.; GUIMARÃES, T. T.; MAUAD, F. F. Avaliação de Aperfeiçoamento de MDT para Aplicação no Estudo de Perda de Solo. In: Anais, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. **Anais...** In: II Congresso Internacional de Hidrossedimentologia. Foz do Iguaçu, PR, Brasil: ABRH, 19 jun. 2017.

WU, D.; HU, H.; YANG, X. M.; ZHENG, Y. D.; ZHANG, L. H. Digital chart cartography: error and quality control. In: archives of the, **anais...** In: the international photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. 2010. Disponível em: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:z8Tz9IiyHeQJ:www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part2/Papers/69_Paper.pdf+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>. Acesso em: 25 maio. 2017.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: Conceitos e Aplicações**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2013.

ZANI, H.; ASSINE, M. L.; SILVA, A. Batimetria fluvial estimada através de geoestatística em dados orbitais: estudo de caso no rio Paraguai com o sensor ASTER Hir. In: Anais..., Natal, RN, Brasil. **Anais...** In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Natal, RN, Brasil: INPE, 30 de Abril de 2009.

ZARCO-TEJADA, P.; BERNI, J. Vegetation monitoring using a micro-hyperspectral imaging sensor onboard an unmanned aerial vehicle (UAV). In: Proceedings, Castelldefels, Spain. **Anais...** In: EUROCOV 2012, European Spatial Data Research (EUROSDR). Castelldefels, Spain.: 2012.

Anexo 1 - Roteiro de Testes Estatísticos

```
rm(list = ls()) #excluir todas as variáveis

#Carregar bibliotecas
library("circular", lib.loc=~R/win-library/3.3")
library(readxl)

#Carregar valores de tabela em excel
diretorio <- "C:/Users/adeju/Desktop/Dalva/"
fileName <- "3d Bariri"
fileName <- "3D Sequoia"
fileName <- "3D Canon"
hor <- read_excel(paste(diretorio,fileName,".xlsx", sep = ""))

#Obter os erros para latitude e longitude
deltaE <- hor$VANT_E - hor$CONTROL_E
deltaN <- hor$VANT_N - hor$CONTROL_N

#Calcular distância geométrica do ponto de controle para o ponto obtido
erro_0 = sqrt(deltaE^2 + deltaN^2)

#Filtrar outliers
erro_d <- c()
sigma <- 0.6*2.5 #0.6 para Sequoia, 0.73 para Canon e 1.68 para Bariri
k <- 0
#for (k in 1: length(erro_0))
while (k < length(erro_0)) {
  k <- k +1
  if (abs(erro_0[k]) < sigma) {
    k
    erro_d[k] <- erro_0[k]
  }
}
erro_d = na.exclude(erro_d) #Exclui valores nulos

#Obter estatísticas
media = mean(erro_d) #média
variancia = var(erro_d) #variancia
desvio = sd(erro_d) #desvio padrão
mediana = median(erro_d, na.rm = TRUE) #mediana
teste_normal_d = shapiro.test(erro_d) #executar teste de normalidade
RMSE = sqrt(mean((erro_d^2), na.rm = TRUE)) #erro médio quadrático
qui2 = chisq.test(abs(erro_d)) #teste chi-quadrado
shapiro.test(erro_d) #teste de normalidade
testet = t.test(dataset$Z_Vant,dataset$Z_Control) #teste T-Student
cor = cor(na.exclude(dataset$Z_Vant),na.exclude(dataset$Z_Control), method = "spearman")
```

```
CV = desvio/media #covariancia
```

```
#Plotar histograma para as distncias EN
```

```
png(filename=paste(diretorio,fileName,'-histograma_EN.png',sep = ""))
hist(erro_d, prob=TRUE, ylim=c(0, 4), col = "lightblue", main = paste("Histograma da discrepncia
EN para", fileName,'\nTeste Shapiro: w=',teste_normal_d$statistic,' p-value=
',teste_normal_d$p.value), xlab = "Discrepncia EN (m)", ylab = "Densidade")
curve(dnorm(x, mean(erro_d), sd(erro_d)), add=TRUE, col="darkblue", lwd=2)
dev.off()
```

```
#calcular o angulo dos erros
```

```
theta <- atan((deltaE)/(deltaN))
```

```
#Excluir valores invlidos
```

```
theta <- abs(na.exclude(theta))
```

```
#Variveis para a contagem dos pontos em cada quadrante
```

```
quad1 <- 0
```

```
quad2 <- 0
```

```
quad3 <- 0
```

```
quad4 <- 0
```

```
#Obter o azimute de acordo com o quadrante
```

```
k <- 1
```

```
while (k <= length(theta)) {
```

```
  if (deltaE[k] > 0 & deltaN[k] > 0) {
```

```
    quad1 <- quad1 + 1
```

```
  }
```

```
  if (deltaE[k] > 0 & deltaN[k] < 0) {
```

```
    theta[k] <- rad(180) - theta[k]
```

```
    quad2 <- quad2 +1
```

```
  }
```

```
  if (deltaE[k] < 0 & deltaN[k] < 0) {
```

```
    theta[k] <- rad(180) + theta[k]
```

```
    quad3 <- quad3 +1
```

```
  }
```

```
  if (deltaE[k] < 0 & deltaN[k] > 0) {
```

```
    theta[k] <- rad(360) - theta[k]
```

```
    quad4 <- quad4 +1
```

```
  }
```

```
  k <- k + 1
```

```
}
```

```
#Transformar theta em objeto circular
```

```
theta <- circular(theta, type = c("angles"))
```

```
#Verifica se o objeto criado  circular
```

```
circular::is.circular(theta)
```

```
#Calcular a direo mdia
```

```

media_c <- abs(mean.circular(theta, na.rm = TRUE))

#Calcular a resultante
resultante <- abs(circular(rho.circular(theta)))

#Plotar gráfico com a distribuição circular de Vonmises
png(filename=paste(diretorio,fileName,'-circular_EN.png',sep = ""))
plot.circular(theta, template = "geographics", stack = TRUE, tol = 0.3, main = paste("Distribuição
de Von Mises para",fileName,"\nResultante=",resultante,"\ntheta médio = ", media_c))
#plot.circular(theta, stack = TRUE, tol = 0.3, main = paste("Distribuição de Von Mises
para",fileName,"\nResultante=",media_c))
ff <- function(x) dvonmises(x, mu=media_c, kappa=0.5)
# deslocamento: Canon zero = 0, Sequoia = 180, Bariri = 90
curve.circular(ff, join=TRUE, xlim=c(-2.3, 1),
               main="título", add = TRUE, tol = 0.3, rotation = "counter", zero = 0)
arrows.circular(media_c, rotation = "counter", zero = 0)
#deltaE+deltaN
dev.off()

#*****estatísticas sobre h*****
erro_0 = hor$CONTROL_h-hor$VANT_h
erro_0 <- na.exclude(erro_0)

#Filtrar outliers
erro <- c()
sigma <- 1.3*2.5 #0.42 Sequoia - 1.28 Canon
k <- 0
#for (k in 1: length(erro_0))
while (k < length(erro_0)) {
  k <- k+1
  if (abs(erro_0[k]) < sigma) {
    k
    erro[k] <- erro_0[k]
  }
}
erro = na.exclude(erro) #exclui valores

#Obter estatísticas
media_h = mean(erro) #médio
variancia_h = var(erro) #variancia
desvio_h = sd(erro) #desvio padrão
mediana_h = median(erro, na.rm = TRUE) #mediana
teste_normal_h = shapiro.test(erro) #executar teste de normalidade
RMSE_h = sqrt(mean((erro^2), na.rm = TRUE)) #erro médio quadrático
qui2_h = chisq.test(abs(erro)) #teste chi-quadrado
testet_h = t.test(dataset$Z_Vant,dataset$Z_Control) #teste T
cor_h = cor(na.exclude(dataset$Z_Vant),na.exclude(dataset$Z_Control), method = "spearman")
CV_h = desvio/media #Covariancia

```

```
shapiro.test(erro) #Teste de normalidade Shapiro Wilk
```

```
#Plotar histograma para h
png(filename=paste(diretorio,fileName,'-histograma_h.png',sep = ""))
hist(erro, prob=TRUE, ylim=c(0, 1.5), main = paste("Histograma da discrepncia h para",
fileName,'\nTeste Shapiro: w=',teste_normal_h$statistic,' p-value= ',teste_normal_h$p.value), ylab =
"Densidade", xlab = "Discrepncia h (m)", col = "lightblue")
curve(dnorm(x, mean(erro), sd(erro)), add=TRUE, col="darkblue", lwd=2)
dev.off()
```

```
#grafico qq
#png(file=paste('saida/',files[i],j,'qq.png',sep = ""))
qqnorm(y)
qqline(y)
#dev.off()
```

```
#Distribuio dos pontos da amostra
#png(file=paste('saida/',files[i],j,'plot.png',sep = ""))
plot(hor$CONTROL_E, hor$VANT_E, xlab = "E (m)",ylab = "N (m)")
#dev.off()
```

```
#Aplicao do shapiro sobre a mdia mvel de 3 elementos
#mm <- c()
#k <- 0
#while (k < length(erro)) {
# k <- k +1
# mm[k] <- (erro[k] + erro[k+1] + erro[k+2])/3
#}
#mm <- na.exclude(mm)
#shapiro.test(mm)
```

Anexo 2 - Limites máximos estimados para o parâmetro de concentração k, para valores calculados de R médio

$\bar{R}$	k	$\bar{R}$	k	$\bar{R}$	k
0	0	0,34	0,72356	0,68	1,89637
0,01	0,02	0,35	0,74783	0,69	1,95357
0,02	0,04001	0,36	0,77241	0,7	2,01363
0,03	0,06003	0,37	0,7973	0,71	2,07685
0,04	0,08006	0,38	0,82253	0,72	2,14359
0,05	0,10013	0,39	0,84812	0,73	2,21425
0,06	0,12022	0,4	0,87408	0,74	2,2893
0,07	0,014034	0,41	0,90043	0,75	2,3693
0,08	0,16051	0,42	0,9272	0,76	2,4549
0,09	0,18073	0,43	0,9544	0,77	2,54686
0,1	0,20101	0,44	0,98207	0,78	2,64613
0,11	0,22134	0,45	1,01022	0,79	2,75382
0,12	0,24175	0,46	1,03889	0,8	2,87129
0,13	0,26223	0,47	1,0681	0,81	3,0002
0,14	0,28279	0,48	1,09788	0,82	3,14262
0,15	0,30344	0,49	1,12828	0,83	3,30114
0,16	0,32419	0,5	1,15932	0,84	3,47901
0,17	0,34503	0,51	1,19105	0,85	3,68041
0,18	0,36599	0,52	1,2235	0,86	3,91072
0,19	0,38707	0,53	1,25672	0,87	4,17703
0,2	0,40828	0,54	1,29077	0,88	4,48876
0,21	0,42962	0,55	1,3257	0,89	4,85871
0,22	0,4511	0,56	1,36156	0,9	5,3047
0,23	0,47273	0,57	1,39842	0,91	5,8522
0,24	0,49453	0,58	1,43635	0,92	6,5394
0,25	0,51649	0,59	1,47543	0,93	7,4257
0,26	0,53863	0,6	1,51574	0,94	8,06104
0,27	0,56097	0,61	1,55738	0,95	10,2716
0,28	0,5835	0,62	1,60044	0,96	12,7661
0,29	0,60625	0,63	1,64506	0,97	16,9266
0,3	0,62922	0,64	1,69134	0,98	25,2522
0,31	0,65242	0,65	1,73945	0,99	50,2421
0,32	0,67587	0,66	1,78953	1	∞
0,33	0,69958	0,67	1,84177		

Anexo 3 - Rotina para Verificação da hipótese Prévia e determinação de medidas estatísticas

Para verificar a hipótese prévia e determinar as medidas estatísticas de qualidade foi elaborada uma rotina no software R. Este software opera na modalidade *open source*. É uma linguagem e um ambiente para cálculos estatísticos e plotagem de gráficos. Fornece uma grande variedade de estatísticas linear, não linear, testes clássicos, análises temporais e de *clusters* (R Team, 2014).

Os dados são extraídos do produto em verificação e seus homólogos de uma fonte mais precisa. Para a verificação da exatidão horizontal, o dados de entrada são a posição dos pontos e o par de coordenadas em análise C_{RPAS} e $C_{controle}$. A rotina é descrita a seguir e o *script* é mostrado no anexo 1.

- 1) Os dados (Id do pontos, E, N, C_{RPAS} , $C_{controle}$) são importados para o ambiente RStudio.
- 2) São calculadas as discrepâncias iniciais, “erro_0 = $C_{RPAS} - Z_{controle}$ ”.
- 3) É feita a inspeção de pontos anômalos (*outliers*) em que, se “erro_0 $\geq 3 \times \sigma_{priori}$ ”; erro recebe NA (no available), senão erro recebe erro_0, calculado em 2.
- 4) Realiza-se o teste de hipótese prévia. Foi adotado o teste de Shapiro Wilk para verificar se erros cumprem a função normal. Então calcula-se o valor do parâmetro w e p-valor.
- 5) Calcula-se as medidas estatísticas descritivas: média, mediana, desvio padrão, variância e RMSE.
- 6) Plota-se os gráficos: Histograma com curva da função normal
- 7) Gera-se arquivo com resultados: p-valor, w, média, mediana, desvio padrão, variância e RMSE.

Anexo 4 - Elevações extraídas da malha regular 30 x 30 m alocadas nas seções transversais e a diferença entre elas no MDT-controle e MDT-RPAS

Id Ponto	UTM 22S, SIRGAS 2000		h_RPAS	h_controle	Diferenças	Dif. $< 3\sigma_0$
	E (m)	N (m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	732418	7548700	427,331	428,309	-0,977	-0,977
2	732448	7548700	428,515	429,323	-0,808	-0,808
3	732478	7548700	429,110	430,484	-1,374	-1,374
4	732388	7548670	427,185	427,268	-0,083	-0,083
5	732418	7548670	428,143	428,562	-0,419	-0,419
6	732448	7548670	428,720	429,071	-0,352	-0,352
7	732478	7548670	429,059	430,215	-1,156	-1,156
8	732508	7548670	428,530	431,156	-2,626	-2,626
9	732388	7548640	427,888	427,123	0,764	0,764
10	732418	7548640	428,433	427,988	0,445	0,445
11	732448	7548640	428,800	428,820	-0,021	-0,021
12	732478	7548640	428,666	429,747	-1,081	-1,081
13	732508	7548640	428,305	430,837	-2,532	-2,532
14	732388	7548610	427,861	426,737	1,124	1,124
15	732418	7548610	428,371	427,557	0,814	0,814
16	732448	7548610	428,606	428,600	0,007	0,007
17	732478	7548610	428,323	429,683	-1,360	-1,360
18	732508	7548610	427,909	430,398	-2,490	-2,490
19	732358	7548580	425,693	425,111	0,582	0,582
20	732388	7548580	427,423	425,953	1,470	1,470
21	732418	7548580	428,081	426,929	1,153	1,153
22	732448	7548580	427,975	428,065	-0,091	-0,091
23	732478	7548580	428,186	429,355	-1,169	-1,169
24	732508	7548580	428,075	430,803	-2,728	-2,728
25	732538	7548580	429,013	430,873	-1,860	-1,860
26	732358	7548550	425,928	424,871	1,057	1,057
27	732388	7548550	427,316	425,072	2,244	2,244
28	732418	7548550	427,643	426,038	1,605	1,605
29	732448	7548550	427,843	427,745	0,098	0,098
30	732478	7548550	428,240	429,037	-0,797	-0,797
31	732508	7548550	428,879	431,854	-2,975	-2,975
32	732538	7548550	429,113	430,915	-1,802	-1,802
33	732358	7548520	426,262	424,631	1,631	1,631
34	732388	7548520	426,967	424,398	2,569	2,569
35	732418	7548520	427,715	426,428	1,288	1,288

Cont. Anexo 4 - Elevações extraídas da malha regular 30 x 30 m alocadas nas seções transversais e a diferença entre elas no MDT-controle e MDT-RPAS

Id Ponto	UTM 22S, SIRGAS 2000		h_RPAS	h_controle	Diferenças	Dif. < 3 σ
	E (m)	N (m)	(m)	(m)	(m)	(m)
36	732448	7548520	428,105	427,367	0,738	0,738
37	732478	7548520	428,783	427,999	0,784	0,784
38	732508	7548520	429,319	429,262	0,057	0,057
39	732538	7548520	429,019	430,207	-1,188	-1,188
40	732358	7548490	426,536	424,110	2,426	2,426
41	732388	7548490	427,577	424,855	2,722	2,722
42	732418	7548490	427,958	426,677	1,281	1,281
43	732448	7548490	428,582	427,419	1,163	1,163
44	732478	7548490	428,743	428,412	0,330	0,330
45	732508	7548490	429,066	428,330	0,736	0,736
46	732538	7548490	429,161	429,737	-0,576	-0,576
47	732568	7548490	429,989	430,506	-0,516	-0,516
48	732358	7548460	430,325	423,470	6,855	
49	732388	7548460	428,357	425,437	2,920	2,920
50	732418	7548460	428,611	426,667	1,944	1,944
51	732448	7548460	428,742	427,409	1,333	1,333
52	732478	7548460	428,631	428,311	0,320	0,320
53	732508	7548460	429,003	428,721	0,282	0,282
54	732538	7548460	429,402	429,329	0,073	0,073
55	732568	7548460	429,877	430,847	-0,970	-0,970
56	732358	7548430	426,059	423,180	2,880	2,880
57	732388	7548430	426,185	425,051	1,135	1,135
58	732418	7548430	428,055	426,571	1,483	1,483
59	732448	7548430	428,721	427,399	1,322	1,322
60	732478	7548430	428,909	428,248	0,661	0,661
61	732508	7548430	429,373	429,072	0,301	0,301
62	732538	7548430	429,614	429,062	0,552	0,552
63	732568	7548430	429,895	430,048	-0,153	-0,153
64	732358	7548400	424,475	423,418	1,057	1,057
65	732388	7548400	425,844	424,552	1,292	1,292
66	732418	7548400	427,429	426,425	1,004	1,004
67	732448	7548400	428,201	427,344	0,857	0,857
68	732478	7548400	427,217	425,918	1,299	1,299
69	732508	7548400	428,532	428,296	0,236	0,236
70	732538	7548400	429,696	429,298	0,398	0,398

Cont. Anexo 4 - Elevações extraídas da malha regular 30 x 30 m alocadas nas seções transversais e a diferença entre elas no MDT-controle e MDT-RPAS

Id Ponto	UTM 22S, SIRGAS 2000		h_RPAS	h_controle	Diferenças	Dif. $< 3\sigma_o$
	E (m)	N (m)	(m)	(m)	(m)	(m)
71	732568	7548400	430,206	429,892	0,314	0,314
72	732598	7548400	430,926	430,168	0,759	0,759
73	732328	7548370	418,811	421,818	-3,007	-3,007
74	732358	7548370	423,892	422,648	1,244	1,244
75	732388	7548370	425,223	423,680	1,543	1,543
76	732418	7548370	426,101	424,872	1,229	1,229
77	732448	7548370	425,724	424,852	0,872	0,872
78	732478	7548370	426,734	425,245	1,489	1,489
79	732508	7548370	429,611	428,664	0,947	0,947
80	732538	7548370	430,089	429,145	0,944	0,944
81	732568	7548370	430,434	429,199	1,235	1,235
82	732598	7548370	431,132	429,897	1,235	1,235
83	732358	7548340	423,017	421,942	1,075	1,075
84	732388	7548340	423,865	422,503	1,362	1,362
85	732418	7548340	425,028	423,418	1,610	1,610
86	732448	7548340	426,613	425,094	1,519	1,519
87	732478	7548340	429,159	426,725	2,434	2,434
88	732508	7548340	430,544	428,301	2,243	2,243
89	732538	7548340	430,378	428,773	1,604	1,604
90	732568	7548340	430,953	429,768	1,186	1,186
91	732598	7548340	432,153	430,522	1,631	1,631
92	732358	7548310	422,186	421,830	0,355	0,355
93	732388	7548310	423,301	421,257	2,044	2,044
94	732418	7548310	424,799	424,321	0,478	0,478
95	732448	7548310	426,675	424,060	2,616	2,616
96	732478	7548310	428,881	426,034	2,847	2,847
97	732508	7548310	430,350	428,166	2,184	2,184
98	732538	7548310	430,703	428,454	2,250	2,250
99	732568	7548310	431,839	430,275	1,564	1,564
100	732388	7548280	423,507	421,771	1,736	1,736
101	732418	7548280	424,003	422,156	1,847	1,847
102	732448	7548280	425,624	423,395	2,229	2,229
103	732478	7548280	427,741	425,219	2,522	2,522

Anexo 5 - Teste de hipótese de normalidade e medidas estatísticas para as 100 simulações da amostragem aleatória

Simulação	Shapiro - Wilk		Medidas Estatísticas					Correlação	
	W	p-valor	media	variancia	desvio	mediana	RMSE	de	Coef. Var.
1	0,9487	0,0007	1,0903	1,5452	1,2430	0,5519	1,2903	0,6989	1,1401
2	0,9737	0,0445	1,1760	1,7802	1,3342	0,6494	1,4038	0,7553	1,1345
3	0,9614	0,0053	1,2383	2,0854	1,4441	0,4959	1,4669	0,6868	1,1662
4	0,9422	0,0004	1,3288	1,6996	1,3037	1,0427	1,5349	0,7680	0,9811
5	0,9449	0,0005	1,1763	1,2794	1,1311	1,0525	1,3811	0,8508	0,9616
6	0,9597	0,0043	1,1972	1,7377	1,3182	0,7712	1,4367	0,7986	1,1011
7	0,9611	0,0054	1,1876	1,8551	1,3620	0,6225	1,4152	0,7722	1,1469
8	0,9638	0,0094	1,1456	1,6439	1,2821	0,7066	1,4046	0,6779	1,1192
9	0,9736	0,0452	1,2059	1,5715	1,2536	0,7672	1,4350	0,8033	1,0395
10	0,9581	0,0031	1,2131	1,5175	1,2319	0,9595	1,4043	0,7960	1,0155
11	0,9696	0,0225	1,1611	1,2706	1,1272	0,9475	1,3680	0,8161	0,9708
12	0,9655	0,0112	1,1594	1,6808	1,2965	0,6676	1,3893	0,7657	1,1182
13	0,9800	0,1426	1,0388	1,2934	1,1373	0,6236	1,2433	0,7996	1,0948
14	0,9738	0,0437	1,1945	1,3725	1,1715	0,8837	1,3886	0,8112	0,9808
15	0,9621	0,0060	1,2967	1,8294	1,3526	0,8961	1,5009	0,8159	1,0431
16	0,9367	0,0001	1,2673	1,9318	1,3899	0,7778	1,4904	0,8117	1,0967
17	0,9683	0,0173	1,2518	1,8889	1,3744	0,7837	1,4797	0,8457	1,0980
18	0,9778	0,1064	1,2016	1,5986	1,2643	0,8115	1,4328	0,7940	1,0522
19	0,9340	0,0001	1,2213	1,8190	1,3487	0,6909	1,4349	0,8279	1,1043
20	0,9646	0,0103	1,2367	1,5018	1,2255	1,0185	1,4433	0,8921	0,9909
21	0,9591	0,0037	1,1914	2,0096	1,4176	0,4519	1,4455	0,6720	1,1899
22	0,9793	0,1382	1,1917	1,6905	1,3002	0,6516	1,4456	0,7281	1,0911
23	0,9441	0,0004	1,2411	1,8883	1,3742	0,6972	1,4365	0,7740	1,1072
24	0,9702	0,0252	1,2442	1,4735	1,2139	1,0369	1,4752	0,8296	0,9757
25	0,9697	0,0229	1,1483	1,6893	1,2997	0,6499	1,3593	0,7514	1,1319
26	0,9823	0,2113	1,0599	1,4184	1,1910	0,5913	1,2847	0,8384	1,1237
27	0,9772	0,0828	1,0940	1,4478	1,2032	0,6539	1,3123	0,8266	1,0998
28	0,9507	0,0010	1,1098	1,3291	1,1529	0,7820	1,3142	0,8229	1,0388
29	0,9654	0,0111	1,2068	1,8070	1,3442	0,7410	1,4121	0,7942	1,1139
30	0,9711	0,0283	1,1367	1,5513	1,2455	0,7695	1,3620	0,7353	1,0957
31	0,9749	0,0552	1,1466	1,3000	1,1402	0,7878	1,3505	0,7849	0,9944
32	0,9552	0,0021	1,3031	1,7353	1,3173	0,9052	1,4949	0,8274	1,0109
33	0,9516	0,0012	1,3698	2,1754	1,4749	0,8797	1,5960	0,7516	1,0767
34	0,9902	0,6992	1,0860	1,4076	1,1864	0,6805	1,3291	0,7867	1,0924
35	0,9705	0,0255	1,2552	2,0585	1,4347	0,6510	1,4791	0,8005	1,1430
36	0,9511	0,0011	1,3329	1,9977	1,4134	0,9729	1,5405	0,6627	1,0604
37	0,9299	0,0001	1,2298	1,7492	1,3226	0,9257	1,4404	0,7581	1,0755
38	0,9698	0,0223	1,2147	1,6328	1,2778	0,8976	1,4282	0,7839	1,0519
39	0,9602	0,0050	1,1786	1,7855	1,3362	0,5832	1,4089	0,7591	1,1337
40	0,9512	0,0011	1,2252	1,8208	1,3494	0,7131	1,4461	0,8130	1,1014
41	0,9600	0,0045	1,2588	1,6498	1,2844	0,9186	1,4800	0,7257	1,0204
42	0,9606	0,0053	1,2084	1,8375	1,3556	0,7209	1,4399	0,7555	1,1218
43	0,9786	0,1108	1,0748	1,3189	1,1484	0,7259	1,2864	0,8121	1,0685
44	0,9684	0,0174	1,1628	1,4120	1,1883	0,8813	1,3489	0,7921	1,0219
45	0,9446	0,0005	1,4244	2,5647	1,6015	0,6544	1,6556	0,6281	1,1243
46	0,9759	0,0687	1,2178	1,6890	1,2996	0,7993	1,4577	0,8450	1,0672
47	0,9318	0,0001	1,1790	1,4321	1,1967	0,9057	1,3531	0,8717	1,0150
48	0,9591	0,0037	1,2006	1,4710	1,2129	0,9425	1,3939	0,8812	1,0102
49	0,9470	0,0007	1,3652	2,1342	1,4609	0,9547	1,5655	0,6336	1,0701
50	0,9552	0,0026	1,3546	2,1326	1,4604	0,8204	1,5940	0,6914	1,0781

Cont. Anexo 5. Teste de hipótese de normalidade e medidas estatísticas para as 100 simulações da amostragem aleatória.

Simulação	Shapiro - Wilk		Medidas Estatísticas					Correlação	
	W	p-valor	media	variancia	desvio	mediana	RMSE	de	Coef. Var.
51	0,9568	0,0027	1,2767	1,8402	1,3565	0,9896	1,5006	0,7442	1,0625
52	0,9739	0,0478	1,1787	1,5508	1,2453	0,8764	1,4142	0,8108	1,0565
53	0,9305	0,0001	1,1890	1,5702	1,2531	0,8295	1,4079	0,7944	1,0539
54	0,9589	0,0038	1,2335	1,8127	1,3464	0,8417	1,4624	0,7660	1,0915
55	0,9669	0,0134	1,2593	1,8133	1,3466	0,8408	1,5191	0,8077	1,0693
56	0,9748	0,0691	1,1999	1,6378	1,2798	0,8802	1,4163	0,7103	1,0666
57	0,9657	0,0110	1,1621	1,8174	1,3481	0,5315	1,4085	0,7759	1,1601
58	0,9680	0,0163	1,2531	1,3268	1,1519	1,0196	1,4563	0,8327	0,9193
59	0,9822	0,2129	1,1044	1,6638	1,2899	0,5721	1,3540	0,8168	1,1680
60	0,9704	0,0262	1,2747	1,6814	1,2967	0,9029	1,4838	0,8064	1,0172
61	0,9553	0,0020	1,1923	1,6940	1,3015	0,8047	1,4293	0,7965	1,0916
62	0,9587	0,0039	1,3018	2,2994	1,5164	0,5531	1,5541	0,7396	1,1648
63	0,9764	0,0695	1,2114	1,9166	1,3844	0,5888	1,4676	0,8213	1,1428
64	0,9764	0,0695	1,2114	1,9166	1,3844	0,5888	1,4676	0,8213	1,1428
65	0,9890	0,6137	1,0702	1,4723	1,2134	0,5044	1,3182	0,7414	1,1338
66	0,9512	0,0011	1,2782	2,1097	1,4525	0,7987	1,5244	0,8024	1,1364
67	0,9672	0,0149	1,1864	1,6450	1,2826	0,7407	1,4099	0,7903	1,0810
68	0,9254	0,0000	1,3202	1,7279	1,3145	1,0827	1,5162	0,8150	0,9957
69	0,9538	0,0019	1,2631	1,8757	1,3695	0,8501	1,4628	0,7137	1,0843
70	0,9694	0,0219	1,1815	1,4386	1,1994	0,8890	1,4025	0,8372	1,0152
71	0,9438	0,0004	1,2413	1,8319	1,3535	0,8767	1,4568	0,7101	1,0904
72	0,9776	0,0924	1,1684	1,4132	1,1888	0,8335	1,4001	0,8279	1,0175
73	0,9505	0,0010	1,2459	1,6216	1,2734	0,8555	1,4335	0,8300	1,0221
74	0,9744	0,0529	1,1855	1,8299	1,3528	0,6356	1,4325	0,8601	1,1410
75	0,9744	0,0521	1,1295	1,7520	1,3236	0,5352	1,3831	0,8014	1,1719
76	0,9757	0,0664	1,1344	1,8730	1,3686	0,4165	1,3980	0,6550	1,2064
77	0,9661	0,0130	1,1035	1,3791	1,1743	0,7722	1,3473	0,7202	1,0642
78	0,9903	0,6916	1,0900	1,2781	1,1305	0,6600	1,3175	0,8723	1,0372
79	0,9684	0,0174	1,1639	1,5722	1,2539	0,6801	1,3914	0,7956	1,0773
80	0,9622	0,0082	1,2451	1,4223	1,1926	0,9576	1,4885	0,7707	0,9579
81	0,9602	0,0047	1,3273	2,0087	1,4173	0,9183	1,5564	0,7831	1,0678
82	0,9704	0,0274	1,1932	1,4579	1,2074	0,8932	1,4245	0,7635	1,0120
83	0,9560	0,0026	1,1722	1,7428	1,3202	0,7025	1,3718	0,7790	1,1263
84	0,9798	0,1316	1,2427	1,7016	1,3044	0,9796	1,5084	0,7930	1,0497
85	0,9635	0,0075	1,2664	1,7313	1,3158	0,8956	1,4692	0,8639	1,0390
86	0,9686	0,0199	1,1827	1,6703	1,2924	0,6995	1,3824	0,7036	1,0928
87	0,9234	0,0000	1,3650	1,8413	1,3569	1,1235	1,5288	0,7276	0,9941
88	0,9807	0,1565	1,1965	1,7892	1,3376	0,6628	1,4525	0,7814	1,1180
89	0,9831	0,2463	1,0420	1,2100	1,1000	0,6542	1,2490	0,8799	1,0557
90	0,9671	0,0140	1,1963	1,6373	1,2796	0,7007	1,4393	0,7991	1,0696
91	0,9524	0,0012	1,2008	1,8143	1,3469	0,6567	1,4738	0,7807	1,1218
92	0,9230	0,0000	1,3718	2,2880	1,5126	0,7797	1,5704	0,7885	1,1026
93	0,9712	0,0329	1,1965	1,8234	1,3503	0,6359	1,4760	0,6986	1,1286
94	0,9547	0,0024	1,1946	1,8085	1,3448	0,6950	1,4321	0,7744	1,1257
95	0,9720	0,0317	1,0973	1,7155	1,3098	0,4668	1,3561	0,6801	1,1936
96	0,9914	0,7857	1,1393	1,7333	1,3166	0,4895	1,3845	0,7242	1,1556
97	0,9491	0,0009	1,2855	1,6536	1,2859	1,0364	1,4504	0,8209	1,0003
98	0,9394	0,0002	1,1547	1,5192	1,2325	0,8439	1,3968	0,7630	1,0674
99	0,9589	0,0036	1,3623	2,1561	1,4684	0,6781	1,5949	0,7760	1,0778
100	0,9608	0,0052	1,2915	1,9142	1,3835	0,9328	1,5182	0,7686	1,0713