



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

FÁBIO CARNEIRO LOBO

CONTRIBUIÇÕES DA AEROFOTOGRAMETRIA POR AERONAVES
REMOTAMENTE PILOTADAS PARA FINS DE PROJETOS RODOVIÁRIOS

FORTALEZA
2022

FÁBIO CARNEIRO LOBO

CONTRIBUIÇÕES DA AEROFOTOGRAMETRIA POR AERONAVES REMOTAMENTE
PILOTADAS PARA FINS DE PROJETOS RODOVIÁRIOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de transportes.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto Uchôa da Silva.

FORTALEZA
2022

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

- L783c Lobo, Fábio.
Contribuições da aerofotogrametria por aeronaves remotamente pilotadas para fins de projetos rodoviários / Fábio Lobo. – 2022.
158 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Carlos Augusto Uchôa da Silva.
1. Aerofotogrametria por drones. 2. Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP). 3. Georreferenciamento Direto. 4. Posicionamento relativo cinemático pós processado (PPK). 5. Levantamento em corredores. I. Título.

CDD 388

FÁBIO CARNEIRO LOBO

CONTRIBUIÇÕES DA AEROFOTOGRAMETRIA POR AERONAVES REMOTAMENTE
PILOTADAS PARA FINS DE PROJETOS RODOVIÁRIOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de transportes.

Aprovada em: ____/____/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Augusto Uchôa da Silva. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Adryane Gorayeb Nogueira Caetano (Examinador Externo)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira (Examinador Externo)
Universidade Federal de Goiás (UFG)

Prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira (Examinador Externo)
Universidade Federal de Goiás (UFG)

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira (Examinador Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho à minha companheira de tanto carinho e acalanto nas horas de incertezas; surdez diante de ferramentas barulhentas e alguma paciência nos momentos de bagunça generalizada... Magna Dávila, minha Pequi(nininha), sem sua presença esse caminho não teria sentido!

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares em Goiânia, que tão bem me acolheram no período da coleta dos dados, meus mais profundos agradecimentos — em especial à minha mãe, Maria Risoleta, e meus irmãos, Lauro e Hugo. Ao meu pai, Hélio Lobo (*in memoriam*): saudades e a certeza de que estivestes em mim o tempo todo.

Aos amigos e parceiros, engenheiro Luís Flávio e engenheiro Wandehur JR, que tanto me auxiliaram com inestimável apoio financeiro para a coleta de dados; aprazíveis momentos de conversa e incomensurável apoio moral e pessoal nos momentos de incerteza. Meu fraterno e sincero agradecimento — incluindo aqui a família de ambos e os colegas da RTA Engenheiros Consultores.

Ao professor Uchôa, orientador da tese e meu mais novo parceiro de desenvolvimento acadêmico e pessoal, por encarar uma pesquisa tão “fora de estrada” e pela perseverança em me auxiliar na busca pelos melhores caminhos.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, PETRAN, que tão bem me acolheram e me auxiliaram no desenvolvimento da tese. Agradeço também, e em especial, todos da área administrativa e de manutenção da estrutura física — sempre me atenderam com muita atenção e presteza.

À toda equipe do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG) da Universidade Federal de Goiás, representada pelo Prof. Manuel Ferreira e pelo Bel. em Ciências Ambientais João Vitor, que me deram inestimável apoio no desenvolvimento dos textos e na coleta de dados, muitíssimo agradecido!

Aos professores e servidores do Instituto Federal de Educação de Goiás, representados por Prof. João Côrtes, Prof. Nilton Nazareno e Prof. Leomar Jr, que tanto me ajudaram com as “catapultadas”, nos ajustes e com conselhos para melhor entendimento dos dados coletados ao longo dos caminhos empoeirados da tese. Meu muito obrigado!

Ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), na pessoa do superintendente regional de GO/DF, engenheiro Volnei Vieira de Freitas, pela autorização de acesso e utilização dos dados técnicos do trecho levantado (processo DNIT nº 50612.002507/2020-20), meu agradecimento.

Ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), pela liberação funcional para o período de estudos e construção desta tese, em especial aos colegas da Diretoria de Geociências, aqui representados pelos engenheiros José Augusto Faes e Geraldo Santos Landovsky, meu fraterno agradecimento.

*[...] tocando os dias pela longa estrada, eu vou,
estrada eu sou [...]*

Renato Teixeira e Almir Sater

RESUMO

Aeronaves remotamente pilotadas (ARP) têm sido cada vez mais usadas como plataformas para aerofotogrametria. Sua facilidade de operação, ainda que restrita por regulamentações brasileiras, combinada à capacidade de gerar produtos de boa qualidade cartográfica, são fatores que explicam essa popularização nas inúmeras áreas do conhecimento, incluindo aí projetos rodoviários. Há pouca produção acadêmica tanto acerca da avaliação de estruturas geométricas de coleta de corredor em linha simples, quanto da avaliação de produtos gerados, associados com o georreferenciamento direto (GD) das fotos por correção pós-processada (PPK). O presente estudo objetiva detalhar o uso geral de ARP para obtenção de informações geoespaciais e avaliar o GD-PPK em coberturas de elementos lineares de infraestrutura, investigando se os produtos dele decorrentes são compatíveis com as normas brasileiras, para serem usados nos projetos executivos de rodovias. Para atingir os objetivos propostos, realizou-se a cobertura aerofotogramétrica de um trecho rodoviário com cerca de 6,3 km de extensão, por dois voos contíguos, com geometria em corredor, contendo três faixas de voo cada. Marcações de solo foram pintadas para servirem de pontos de controle e checagem. As fotos coletadas foram rearranjadas em 24 grupos de análise (obtidos a partir da combinação de seis tipos de geometrias de coleta, com quatro tipos de controle do processo fotogramétrico). Implementou-se uma sequência de Monte Carlo para a obtenção de 100 amostras por grupo — possibilitando avaliar as possibilidades de os grupos gerarem dados enviesados pela presença erros sistemáticos (tendência planimétrica e/ou altimétrica), através da implementação de regressões logísticas binomiais. Os resultados demonstram que a metodologia mais segura e acurada para a geração de produtos decorrentes livres de tendência é a implementação de pontos de controle ao longo do trecho, sem a utilização de GD-PPK. Quanto ao atendimento das exigências de qualidade posicional impostas pelo DNIT, todos os grupos avaliados geraram amostras compatíveis, sendo que os grupos que continham as fotos da linha central tiveram poucas amostras condizentes com as exigências de qualidade. A partir do perfilamento GNSS-RTK de cerca de 2 km do trecho, gerou-se um exemplar de Modelo Numérico do Terreno (MNT), possibilitando sua comparação a doze produtos gerados pelos tipos de geometria e controle do processo aerofotogramétrico, coincidentes com a área de cobertura GNSS-RTK. As comparações apontam que os produtos aerofotogramétricos são bem mais acurados que aquele obtido pela cobertura GNSS-RTK, sendo capazes de descrever o terreno de forma mais detalhada.

Palavras-chave: Aerofotogrametria por drones. Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP). Georreferenciamento Direto. Posicionamento relativo cinemático pós processado (PPK). Levantamento em corredores. Projetos executivos de rodovias.

ABSTRACT

Remotely piloted aircraft (RPA) have been increasingly used as platforms for aerial photogrammetry. Its ease of operation, although restricted by Brazilian regulations, combined with the ability to generate products of good cartographic quality are factors that explain this popularization in numerous areas of knowledge, including road projects. There is little academic production both on the evaluation of geometric structures of single-line corridor collection, and on the evaluation of generated products, associated with the direct georeferencing (GD) of the photos by post-processed correction (PPK). The present study aims to detail the general use of ARP to obtain geospatial information and evaluate the GD-PPK, in coverage of linear elements of infrastructure, investigating whether the resulting products are compatible with Brazilian standards, to be used in executive projects of highways. . In order to achieve the proposed objectives, an aero photogrammetric coverage of a road stretch of about 6.3 km was carried out, by two contiguous flights, with corridor geometry, containing 3 lanes each. Ground marks were painted to serve as checkpoints and checkpoints. The collected photos were rearranged into 24 analysis groups (obtained from the combination of 6 types of collection geometries, with 4 types of photogrammetric process control), a Monte Carlo sequence was implemented to obtain 100 samples per group — making it possible to evaluate the possibilities of the groups to generate data biased by the presence of systematic errors (planimetric and/or altimetric trends), through the implementation of binomial logistic regressions. The results demonstrate that the safest and most accurate methodology for generating trend-free products is the implementation of control points along the stretch, without the use of GD-PPK. As for meeting the positional quality requirements imposed by the DNIT, all the evaluated groups generated compatible samples, and the groups that contained the photos of the central line had few samples consistent with the quality requirements. From the GNSS-RTK profiling of about 2 km of the stretch, a Numerical Model of the Terrain (NMT) was generated, allowing its comparison to twelve products generated by the types of geometry and control of the aero photogrammetric process coinciding with the coverage area. GNSS-RTK. The comparisons show that the aero photogrammetric products are much more accurate than the one obtained by the GNSS-RTK coverage, being able to describe the terrain in a more detailed way.

Keywords: Drone aerial photogrammetry. Remotely Piloted Aircraft (RPA). Direct Georeferencing (DG). Post-processed kinematic relative positioning (PPK). Corridor survey. Executive highway projects.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Fluxograma simplificado do método empregado na revisão	25
Figura 2.2 - Distribuição dos tipos de trabalhos revisados no período de 2008-2018.....	27
Figura 2.3 - Distribuição das monografias avaliadas ao longo do território nacional.....	28
Figura 2.4 - Áreas do conhecimento e classes dos trabalhos avaliados.....	29
Figura 2.5 - Aplicações e classes dos trabalhos ao longo dos anos.....	30
Figura 2.6 - Bases Legais (BL) nas monografias.	31
Figura 2.7 - Tipos de aeronaves utilizadas nas monografias ao longo dos anos.	32
Figura 2.8 - Trabalhos que citam a correção para a distorção das lentes (CL).....	33
Figura 2.9 - Trabalhos que apresentaram planejamento em Corredores (PC).....	34
Figura 2.10 - Trabalhos que citam o termo 'RTK'.	34
Figura 2.11 - Monografias em que se verifica a qualidade dos produtos por normas cartográficas (NC).....	35
Figura 2.12 - Uso de visão computacional nas monografias.	36
Figura 2.13 - Comparações com outros dados nas monografias (CA/CT) em suas aplicações.	38
Figura 3.1 - Exemplos de modelos de ARP, aeronaves remotamente pilotadas	50
Figura 3.2 - Triangulação de raios projetivos na determinação de um ponto pertencente à feição.....	51
Figura 3.3 - Rotação nos eixos de coleta	52
Figura 3.4 - Esquema da translação altimétrica.....	54
Figura 3.5 - Área de estudos e localização do segmento rodoviário analisado.	55
Figura 3.6 - Área de cobertura dos voos.....	56
Quadro 3.1 - Resumo da coleta aerofotogramétrica.....	56
Figura 3.7 - Vista superior do esquema de distribuição das marcações em solo.....	57
Figura 3.8 - Distribuição das marcações e local das bases RTK utilizadas em campo.	57
Figura 3.9 - Fluxograma de geração dos produtos, segundo o TRATAMENTO.	59
Figura 3.10 - Efeito do erro tipo 'Domo' em um modelo de superfície	63
Figura 3.11 - Precisões das marcações de solo, gráfico box-plot.....	64
Figura 3.12 - Distribuição das marcações e local das bases RTK utilizadas em campo.	66
Figura 3.13 - Precisão planimétrica (2D), altimétrica (Z) e distância de linha de base do processamento GD-PPK	68
Figura 3.14 - Distribuição dos valores de precisão planimetria e altimétrica das fotos	69

Figura 3.15 - Representação esquemática do erro de reprojeção de um ponto tridimensional nas fotos	70
Figura 3.16 - Distribuição do erro de reprojeção dos pontos de amarração pelos níveis de análise da pesquisa.....	70
Quadro 3.2 - Resumo qualitativo das precisões de entrada no MMC.....	71
Figura 3.17 - Parâmetros de referência da acurácia dos dados de entrada utilizados na pesquisa	71
Figura 3.18 - Distribuição da quantidade de pontos de checagem ao longo dos grupos de pesquisa.....	72
Figura 3.19 - Hotspots da distribuição espacial dos pontos de checagem ao longo das coberturas.....	73
Figura 3.20 - Fluxo de avaliação da tendência a partir dos valores de DIF_X, DIF_Y e DIF_Z	75
Figura 3.22 - Probabilidade dos níveis de COBERTURA e TRATAMENTO apresentar as respostas do TESTE_Z.	79
Quadro 3.3 - Combinações de TEN_X, TEN_Y e VC para a obtenção de TEN_2D.	80
Figura 3.23 - Composição da variável TEN_2D, formada pelos níveis de TEN_X, TEN_Y e VC.....	80
Figura 3.24 - Composição da variável TEN_Z_bin a partir dos níveis de TESTE_Z.....	81
Figura 3.25 - Curva ROC da regressão binomial logística de TEN_Z_bin.....	82
Figura 3.26 - Probabilidade dos diferentes níveis de COBERTURA e TRATAMENTO apresentar tendência altimétrica.....	83
Figura 3.27 - Curva ROC da regressão binomial logística de TEN_2D.....	84
Figura 3.28 - Probabilidade dos diferentes níveis de COBERTURA e TRATAMENTO apresentar tendência planimétrica.....	85
Figura 3.29 - Probabilidades dos níveis de COBERTURA e TRATAMENTO em ter tendência na planimetria ou altimetria.	86
Figura 3.30 - Probabilidade dos diferentes níveis de TRATAMENTO apresentar tendência planimétrica, considerando somente a cobertura de voo VV2 (que agrega tanto a COBERTURA V2 quanto a V2C).....	88
Figura 3.31 - Distribuição dos elementos TENDÊNCIA = Pass nos grupos de análise.....	89
Figura 3.32 - Distribuição dos valores de RMSE_2D e RMSE_Z, agrupados pelo resultado de TENDÊNCIA.....	91

Figura 3.33 - Distribuição dos valores de RMSE_2D e RMSE_Z, agrupados pelo resultado de TENDÊNCIA.....	92
Figura 3.34 - Valores de RMSE_2D agrupado pela geometria de coleta (3F – 3 Faixas; FC – Faixa única central) ao longo dos níveis de TRATAMENTO.	93
Figura 3.35 - Valores de RMSE_Z agrupados pela geometria de coleta (3F – 3 Faixas; FC – Faixa única central) ao longo dos níveis de TRATAMENTO.	94
Figura 3.36 - Diagrama aluvial dos fluxos entre TRATAMENTO, COBERTURA, TENDÊNCIA, GEOMETRIA e RMSE_3D.....	95
Figura 3.37 - Resultados das avaliações de A1000 e A500	100
Figura 3.38 - Composição de COBERTURA e TRATAMENTO das amostras aprovadas nas análises de compatibilidade com as exigências da classe A nas escalas 1/500 e 1/1000, de acordo com PAP-PCD.....	100
Figura 3.39 - Proporção entre coberturas coletadas por geometria de 3 faixas e de faixa única central de elementos compatíveis com a escala 1/1000 na classe A do PAP-PCD	101
Figura 3.40 - Diagrama aluvial da relação de TRATAMENTO, COBERTURA, RMSE_3D com os níveis da variável A1000, representante da análise de compatibilidade com as exigências de classe A do PAP-PCD na escala 1/1000.....	102
Figura 3.41 - Resultados das avaliações de C005A e CN10A.....	103
Figura 3.42 - Composição de COBERTURA e TRATAMENTO das amostras aprovadas nas análises de compatibilidade com as exigências da classe A para curvas de nível com equidistâncias de meio metro (CN05) e um metro (CN10), de acordo com PAP-PCD.	104
Figura 3.43 - Diagrama aluvial da relação de TRATAMENTO, COBERTURA, RMSE_3D com os níveis da variável CN10A, representante da análise de compatibilidade com as exigências de classe A do PAP-PCD para produtos compatíveis com curvas de nível de metro em metro.	104
Figura 3.44 - Diagrama aluvial da relação de TRATAMENTO e Geometria de coleta com os níveis das variáveis CN10A e A1000, respectivamente, representantes da análise de compatibilidade com as exigências de classe A do PAP-PCD para produtos altimetricamente compatíveis com curvas de nível de metro em metro e planimetricamente com a escala 1/1000.	105
Figura 4.1 - Diferenças entre Modelo de Superfície (MS) e Modelo do Terreno (MT).....	112
Figura 4.2 - Exemplos de modelos de ARP, aeronaves remotamente pilotadas	114

Figura 4.3 - Triangulação de raios projetivos na determinação de um ponto pertencente à feição.....	114
Figura 4.4 - Rotação nos eixos de coleta	115
Figura 4.5 - Localização do segmento rodoviário investigado.....	117
Figura 4.6 - Pontos coletados por GNSS/RTK, entre as estacas E5+00 e E102+00 da obra.	118
Figura 4.7 - Dispersão das precisões nos pontos de coleta GNSS/RTK.....	119
Figura 4.8 - Área de cobertura dos voos.....	120
Quadro 4.1 - Resumo da coleta aerofotogramétrica.....	121
Figura 4.9 - Vista superior do esquema de distribuição das marcações em solo.....	121
Figura 4.10 - Distribuição das marcações e local das bases RTK utilizadas em campo.	122
Figura 4.11 - Fluxo de produção no software METASHAPE.	128
Figura 4.12 - Fluxo de produção no software GLOBALMAPPER.....	128
Figura 4.13 - Esquema da translação altimétrica.....	132
Figura 4.14 - Quantitativos dos tipos de pontos coletados em campo.....	132
Figura 4.15 - Produto MNT-CA, pontos e linhas que o formam com a seção transversal ndo perfil na estaca E24+00.....	133
Figura 4.16 - RMSE_25 nas classes dos 25 pontos de checagem obtidos da coleta GNSS/RTK.	134
Figura 4.17 - Valores de RMSE_2D e RMSE_Z dos produtos MNT livres de tendência....	135
Figura 4.18 - Diagrama aluvial da relação de TRATAMENTO e Geometria de coleta	136
Figura 4.19 - Box-plot dos valores DIF_2D e DIF_Z entre os tipos de tratamento dos produtos MNT aerofotogramétricos.	137
Figura 4.20 - Valores RMSE ao longo dos tipos de pontos GNSS pelos tipos de tratamento.	138
Figura 4.21 - Comparação entre os valores RMSE_13 (restrito à pista de rolamento) e RMSE_25 nos produtos gerados nesse estudo, com a indicação de suas respectivas classificações altimétricas no PAP-PCD.	139
Figura 4.22 - Projetos ESCAVA e ATERRO nas duas medidas propostas para a avaliação – buffer de 7m e de 15m.	140
Figura 4.23 - Exemplo de porção do terreno na qual o projeto ATERRO aproveita o volume de corte na superfície.	140
Figura 4.24 - Variação volumétrica entre os produtos aerofotogramétricos e MNT-CA.	141

Figura 4.25 - Variação volumétrica entre os produtos aerofotogramétricos e MNT-CA para os projetos ATERRO e ESCAVA no polígono 1660x30m.	142
Figura 4.26 - Variação volumétrica entre os produtos aerofotogramétricos e MNT-CA, para os cortes no projeto ATERRO e polígono 1660x30m.	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Quantidade de trabalhos de acordo com as aplicações dos estudos.....	29
Tabela 3.1 - Resumo quantitativo de elementos nos grupos de análise.....	61
Tabela 3.2 - Parâmetros fixos para o alinhamento das fotos no programa METASHAPE...	62
Tabela 3.3 - Parâmetros fixos para a otimização do alinhamento das fotos no programa METASHAPE.....	62
Tabela 3.4 - Quantidades de marcações em solo e pontos de checagem ao longo das coberturas realizadas	66
Tabela 3.5 - Precisão média dos pontos nas coberturas e respectivos valores 3x.....	67
Tabela 3.6 - Quantidade percentual pontos de checagem realizados e perdidos, em comparação ao total esperado	72
Tabela 3.7 - Quantidade máxima de pontos por amostras	74
Tabela 3.8 - Distribuição das amostras nos níveis de TESTE_Z.....	76
Tabela 3.9 - Medidas de ajuste da regressão logística multinominal da variável TESTE_Z	77
Tabela 3.10 - Coeficientes da regressão logística multinominal da variável TESTE_Z	78
Tabela 3.11 - Medidas de ajuste da regressão logística binomial da variável TEN_Z_bin. ...	82
Tabela 3.12 - Limiares de AUC para discriminar entre os valores binários avaliados.	82
Tabela 3.13 - Coeficientes da regressão logística binomial da variável TEN_Z_bin.	83
Tabela 3.14 - Medidas de ajuste da regressão logística binomial da variável TEN_2D.....	84
Tabela 3.15 - Coeficientes da regressão logística binomial da variável TEN_2D.....	85
Tabela 3.16 - Valores referência das classes/escalas do PEC, PEC-PCD e PAP-PCD.....	97
Tabela 3.17 - Distribuição de elementos TENDÊNCIA = Pass.	98
Tabela 4.1 - Resumo quantitativo de elementos nos grupos de análise.....	126
Tabela 4.2 - Resolução espacial de produtos cartográficos de acordo com a escala.	127
Tabela 4.3 - Quantidades de produtos aerofotogramétricos processados.	134
Tabela 4.4 - Quantidades de produtos aerofotogramétricos sem tendencias	134
Tabela 4.5 - Valores obtidos de RMSE_2D e RMSE_Z com as marcações de solo nos produtos MNT aerofotogramétricos	137
Tabela 4.6 - Volumes dos projetos no produto MNT-CA (m ³).	141

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
DCEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
ASPRS	<i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
EB	Exército Brasileiro
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MD	Ministério da Defesa
PAP-PCD	Padrão de Acurácia Posicional para Produtos Cartográficos Digitais
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i> , Raiz quadrada do erro médio
_2D	Referência a dados planimétricos
_Z	Referência a dados altimétricos
_3D	Referência a dados planialtimétricos
UFC	Universidade Federal do Ceará
PETTRAN	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes
LAG	Laboratório de Geomática Aplicada da UFC
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
AT	Aerotriangulação ou alinhamento
MDS	Modelo digital de Superfície
MDT	Modelo digital do Terreno
ORTO	Ortomosaico
PPK	<i>Post Processing Kinematic</i> , Posicionamento Cinemático Pós-Processado
RTK	<i>Real Time Kinematic</i> , Posicionamento Cinemático em Tempo Real
SfM	<i>Structure from Motion</i>
GNSS	<i>Global Navigate Satellite Systems</i> , Sistema Global de Navegação por Satélites
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
PPP-IBGE	Sistema on-line de posicionamento por ponto preciso disponibilizado pelo IBGE
RBMC-IP	Sistema on-line de acesso em tempo real aos dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo, disponibilizado pelo IBGE

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Problema de pesquisa.....	19
1.2	Hipótese da pesquisa	19
1.3	Objetivo da pesquisa	20
1.3.1	<i>Objetivos específicos da pesquisa.....</i>	<i>20</i>
1.4	Estrutura do documento	20
2	USO DE PLATAFORMAS AÉREAS NÃO TRIPULADAS NO BRASIL — UM PANORAMA DE DEZ ANOS (2008-2018) DE PUBLICAÇÕES ACADÊMICAS	22
2.1	Introdução	22
2.1	Materiais e Métodos	24
2.2	Resultados e discussões	27
2.3	Avaliação dos parâmetros	30
2.3.1	<i>(BL) Indica as bases legais para coleta de dados via ARP</i>	<i>30</i>
2.3.2	<i>(AF) e (AR) Indicam o tipo de aeronave utilizada na coleta dos dados.....</i>	<i>31</i>
2.3.3	<i>(CL) Correção das distorções das lentes para o processamento fotogramétrico</i>	<i>32</i>
2.3.4	<i>(PC) Planeja a coleta em “Corredores” (em contrapartida de “Blocos”).....</i>	<i>33</i>
2.3.5	<i>(TR) utiliza posicionamento relativo GNSS em tempo real (RTK) para controle do RPA</i>	<i>34</i>
2.3.6	<i>(NC) Utiliza normas cartográficas para verificação dos produtos gerados e (PR) implementa pontos de referência</i>	<i>35</i>
2.3.7	<i>(VC) Processa dados por algoritmo SIFT, SfM ou similar (Visão Computacional)</i>	<i>36</i>
2.3.8	<i>(CT): Compara dados obtidos com os de topografia, fotogrametria ou imageamento terrestre; e (CA): Compara dados obtidos com imagens aéreas, orbitais ou similares</i>	<i>37</i>
2.4	Desafios e perspectivas futuras do uso de ARP para aerofotogrametria	38
2.5	Conclusões.....	39
2.6	Lista das monografias revisadas	40
3	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE POSICIONAL EM LEVANTAMENTOS AEROFOTOGRAMÉTRICOS VIA ARP, NAS COBERTURAS COM GEOMETRIA DE CORREDOR E USO DE GD-PPK	47

3.1	Introdução	47
3.2	Revisão bibliográfica	49
3.3	Materiais e métodos	54
3.3.1	<i>Cobertura aerofotogramétrica</i>	54
3.3.1.1	<i>Controle e checagem do processo aerofotogramétrico</i>	56
3.3.2	<i>Variáveis de análise fotogramétrica e seus níveis</i>	58
3.3.3	<i>Plano de amostragem</i>	59
3.3.4	<i>Amostras de levantamentos pelo Método de Monte Carlo</i>	62
3.3.4.1	<i>Precisão das posições — Marcações de solo</i>	64
3.3.4.2	<i>Precisão das posições — Fotos</i>	67
3.3.4.3	<i>Precisão das reprojeções — Pontos de amarração</i>	69
3.3.4.4	<i>Qualidade geral de entrada no MMC</i>	71
3.3.4.5	<i>Perda de dados pelo MMC</i>	71
3.3.5	<i>Comparações entre coberturas e tratamentos aerofotogramétricos</i>	73
3.3.5.1	<i>Avaliação de tendência</i>	73
3.3.5.2	<i>Teste translação altimétrica</i>	75
3.3.5.3	<i>Avaliação binomial de tendência — presença/ausência</i>	79
3.3.5.4	<i>Tendência altimétrica</i>	81
3.3.5.5	<i>Tendência planimétrica</i>	84
3.3.5.6	<i>Comparações das probabilidades de tendência planimétrica/altimétrica</i>	86
3.3.5.7	<i>Amostras sem tendências — seja planimétrica ou altimétrica</i>	88
3.3.6	<i>Medida de avaliação posicional absoluta</i>	89
3.3.6.1	<i>Classificação em padrão cartográfico</i>	96
3.3.6.2	<i>Classificação planimétrica das amostras</i>	99
3.3.6.3	<i>Classificação altimétrica das amostras</i>	102
3.4	Conclusões	106
4	ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO, OBTIDOS ATRAVÉS DE AEROFOTOGRAMETRIA POR ARP VERSUS GNSS PARA COBERTURA DE CORREDORES	109
4.1	Introdução	109
4.2	Revisão bibliográfica	111
4.3	Materiais e métodos	117
4.3.1.1	<i>Pontos de checagem para coleta GNSS/RTK</i>	119
4.3.2	<i>Cobertura aerofotogramétrica</i>	120

4.3.2.1	<i>Controle e checagem aerofotogramétricos</i>	121
4.3.2.2	<i>Variações de geometria de coleta e de controle aerofotogramétrico</i>	123
4.3.2.3	<i>Plano de amostragem</i>	124
4.4	Padronização dos produtos cartográficos gerados	127
4.4.1	<i>Uso do GeoPEC para avaliação no PAP-PCD</i>	129
4.4.1.1	<i>Cálculo da qualidade posicional absoluta- RMSE</i>	130
4.4.1.2	<i>Avaliação de Tendência e presença de erros grosseiros</i>	131
4.4.2	<i>Modelo numérico do terreno (MNT) dos pontos GNSS/RTK (MNT-CA)</i>	132
4.4.2.1	<i>Avaliação de qualidade do MNT-CA</i>	133
4.4.3	<i>Modelos numéricos do terreno (MNT) da cobertura aerofotogramétrica</i>	134
4.4.3.1	<i>Avaliação de qualidade dos produtos aerofotogramétricos sem tendência</i>	135
4.4.3.2	<i>Diferenças RMSE entre a qualidade do alinhamento e dos produtos decorrentes do processo aerofotogramétrico</i>	136
4.4.3.3	<i>Avaliação altimétrica dos produtos aerofotogramétricos e dos pontos GNSS/RTK</i>	137
4.5	Comparações entre os produtos decorrentes do processo aerofotogramétrico	138
4.5.1	<i>Diferença RMSE altimétrico entre os produtos aerofotogramétricos e MNT-CA</i>	138
4.5.2	<i>Avaliação de volume entre os produtos aerofotogramétricos e MNT-CA</i>	139
4.5.3	<i>Resultados das comparações</i>	142
4.6	Discussão dos resultados	143
4.7	Conclusões	144
5	CONCLUSÕES	146
	BIBLIOGRAFIA	150

1 INTRODUÇÃO

Aeromodelos e drones têm grande apelo recreacional e nos últimos anos vêm ganhando interesse de profissionais em diversas áreas relacionadas à prestação de serviços. A academia tem acompanhado esse interesse e o apoiado com pesquisas para desenvolvimento dos equipamentos em si. Quando utilizados para fins profissionais, são conhecidos como Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP). Também há interesse nos sensores e sistemas que os controlam (eletrônica embarcada), além das aplicações nas quais tais equipamentos podem ser empregados.

Uma das áreas com bom potencial de se apropriar do conjunto dessa tecnologia, que vem sendo desenvolvida e aplicada aos ARP, é a de Engenharia de Transportes — tanto para coleta de informações para as várias etapas de projetos técnicos, quanto para o uso desses equipamentos como elementos logísticos no transporte de mercadorias e/ou pessoas.

Atualmente, os serviços e estudos realizados no território nacional acerca do uso de ARP estão concentrados nos levantamentos aerofotogramétricos que, dependendo da finalidade, podem ser executados com padrão do tipo GRADE, no qual os voos de cobertura apresentam uma geometria de coleta formada por múltiplas linhas e faixas de voo (por vezes linhas cruzadas, para garantir maior robustez geométrica à coleta); ou do tipo CORREDOR, no qual a estrutura geométrica de coleta economiza na quantidade de fotos por área recoberta, com a desvantagem de ser mais frágil, composta por longas linhas de voos ao longo do comprimento da área imageada e, por vezes, com uma única linha de voo. As coletas em corredor são as mais indicadas para coberturas aerofotogramétricas de elementos lineares de infraestrutura, como rodovias, ferrovias, linhas de transmissão, dutos e outros, otimizando a coleta de dados de campo.

Nos levantamentos aerofotogramétricos via ARP, câmeras fotográficas digitais não métricas de pequeno formato são embarcadas em aeronaves, dotadas de Sensores Inerciais de Navegação (INS) para navegação autônoma, com sua geolocalização obtida através de receptores do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), com a finalidade de coletar as imagens que serão utilizadas no processo fotogramétrico.

Para conferir confiabilidade ao processo, é utilizada, via de regra, uma nuvem de Pontos de Controle de Solo (P.CO) que tanto pode ser pré-sinalizada ao voo, quanto por pontos fotoidentificáveis após o processamento dos dados (Pontos de Controle Naturais). Os P.CO possibilitam a obtenção dos parâmetros de orientação exterior no processamento fotogramétrico, constituídos pelas coordenadas planialtimétricas e orientações angulares das

fotos.

Qualquer que seja o tipo de implementação de P.CO, suas coordenadas planialtimétricas devem ser determinadas através de posicionamento preciso GNSS, sendo os métodos de posicionamento GNSS relativos os mais indicados, conforme indicado em IBGE (2008), INCRA (2013 e 2018) e, ainda, DNIT (2018). A utilização dos P.CO acaba por onerar os custos dos levantamentos, demandando maior tempo em trabalhos de campo, conforme pontuam os autores Silva (2015), Alves Jr. (2015) e Luz (2015).

O Georreferenciamento Direto (GD) das posições das fotos, a partir da trajetória corrigida da aeronave é uma opção que visa diminuir a necessidade dos P.CO. O GD tira partido da integração dos dados dos sensores INS e GNSS na obtenção “*quasi-direta*” dos parâmetros de orientação exterior das fotos, sem a obrigatoriedade dos P.CO.

Para que o GD obtenha precisões adequadas a projetos de engenharia, há a necessidade de que a trajetória da aeronave seja corrigida através do método relativo cinemático de posicionamento GNSS, podendo ser tanto em tempo real (RTK, do inglês *Real Time Kinematic*), quanto pós-processado (PPK, do inglês *Post Processed Kinematic*).

A presente pesquisa apresenta um resumo da utilização de ARP para fotogrametria, permitindo um melhor entendimento do uso de GD-PPK em coleta aerofotogramétrica ARP do tipo CORREDOR, investigando a qualidade dos produtos dela decorrentes e avaliando se estes são apropriados para uso em projetos executivos rodoviários.

1.1 Problema de pesquisa

A ausência de estudos comprobatórios da eficácia dos levantamentos aerofotogramétricos ARP com GD-PPK em gerar produtos compatíveis com as normas nacionais de projetos rodoviários dificulta a implementação desse tipo de cobertura de forma sistemática pelos atores envolvidos na manutenção e planejamento da infraestrutura viária brasileira, implicando em um descompasso dessa área do conhecimento com tecnologias que viabilizam maior qualidade e menor custo na obtenção de produtos geoespaciais.

1.2 Hipótese da pesquisa

Produtos decorrentes de cobertura aerofotogramétrica de corredores, realizada por aeronave remotamente pilotada e com implementação de georreferenciamento direto na obtenção do posicionamento das fotos não são compatíveis com as normas exigidas para uso

em projetos executivos rodoviários, a saber: planimetria compatível com o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC, BRASIL, 1984) na classe A para a escala 1/2000 e altimetria PEC-A para curvas de nível de metro em metro.

1.3 Objetivo da pesquisa

Avaliar se as precisões dos produtos aerofotogramétricos decorrentes de coberturas aerofotogramétricas via ARP em formato de corredor com implementação de GD-PPK estão de acordo com as qualidades exigidas nas normas brasileiras para utilização em projetos executivos rodoviários.

1.3.1 Objetivos específicos da pesquisa

- a) Indicar o estado da arte da produção acadêmica nacional acerca da aerofotogrametria via ARP;
- b) Avaliar as implicações do uso de GD-PPK em coleta do tipo CORREDOR;
- c) Avaliar se os produtos gerados são apropriados para uso em projetos executivos rodoviários.

1.4 Estrutura do documento

O presente documento de tese está dividido em cinco capítulos:

a) Capítulo 1, **Introdução**, contextualiza tanto os tipos de geometria de coleta aerofotogramétrica via ARP como os controles utilizados para conferir qualidade ao processo, apresentando o georreferenciamento direto (GD) como uma possibilidade para diminuir, até eliminar, a necessidade de se utilizar pontos de controle no processo. Apresenta, também, o objetivo geral da pesquisa, bem como a estrutura do documento de tese;

b) Capítulo 2, **Uso de plataformas aéreas não tripuladas no Brasil —um panorama de 10 anos (2008-2018) de publicações acadêmicas**, artigo publicado por Lobo *et al.* (2020), apresenta um panorama geral de produtos e métodos utilizados em aerofotogrametria por ARP, indicando que há pouca produção que trate dos impactos de se utilizar a geometria de corredor em associação ao georreferenciamento direto, validando os esforços de desenvolvimento da tese;

Capítulo 3, **Avaliação da qualidade posicional em levantamentos aerofotogramétricos via ARP nas coberturas com geometria de corredor e uso de GD-PPK**, escrito na forma de artigo, investiga dois quesitos chave na avaliação de qualidade da aerotriangulação de fotos obtidas pelo tipo de cobertura estudado: se há propensão para gerar dados com erro sistemático planimétrico e/ou altimétrico (tendência); e se a classificação cartográfica do processo se adequa às exigências das normas nacionais para uso em projetos executivos de engenharia rodoviária. São realizadas avaliações estatísticas entre 24 grupos de análise, formados pela combinação dos quatro níveis da variável TRATAMENTO, que representam tipos de controle do processo aerofotogramétrico, com seis níveis da variável COBERTURA, que indicam tipos de associação e de geometria na coleta das fotos. Cada grupo de análise foi povoado por 100 amostras obtidas pelo Método de Monte Carlo, permitindo avaliar quais grupos apresentam maiores probabilidades de apresentar dados tendenciosos e quais apresentam mais elementos com qualidades apropriadas para uso em projetos executivos rodoviários;

Capítulo 4, **Análise comparativa de modelos digitais de elevação, obtidos através de aerofotogrametria por ARP versus GNSS para cobertura de corredores**, escrito na forma de artigo, investiga as diferenças de qualidade altimétrica entre um modelo numérico de terreno gerado a partir de dados obtidos por meio de coleta GNSS com correção RTK, forma habitual e direta de obtenção de dados do terreno, com 12 obtidos por meio de aerofotogrametria, em que a geração da nuvem de pontos é feita de forma indireta — necessitando de filtragem para que se obtenha somente aqueles pertencentes ao solo. Os produtos são avaliados quanto à capacidade de gerar curvas de nível de metro em metro, em consonância com as normas nacionais para uso em projetos executivos rodoviários; e

c) Capítulo 5, **Conclusões**, apresenta as conclusões gerais da tese, incluindo as percepções do autor a respeito das maiores dificuldades e benefícios em se implementar um fluxo de coleta aerofotogramétrica nas atividades da Engenharia Rodoviária, bem como a proposição de uma linha de estudos futuros baseada nas contribuições da tese.

2 USO DE PLATAFORMAS AÉREAS NÃO TRIPULADAS NO BRASIL — UM PANORAMA DE DEZ ANOS (2008-2018) DE PUBLICAÇÕES ACADÊMICAS¹

Convém destacar que o recorte temporal de uma década, entre 2008 até 2018, usado neste artigo, deve-se ao fato de ele ter sido escrito em 2019, aceito e publicado em 2020 — após o início da revisão da literatura, necessária para o desenvolvimento desta investigação, e antes da pandemia de COVID-19. O período de isolamento social impossibilitou a coleta de dados de campo e, por conseguinte, acabou por estender a conclusão desta tese, provocando este aparente descolamento temporal.

2.1 Introdução

A sigla RPA provém do termo em inglês *Remotely Piloted Aircraft* e está no foco da regulamentação no território nacional, para uso em atividades profissionais dos “Veículos Aéreos Não Tripulados” (VANT, genericamente conhecidos como *drones*). Da mesma forma, RPAS remete a *Remotely Piloted Aircraft System* e agrega ao RPA todos “os enlaces de comando e controle requeridos e quaisquer outros elementos que podem ser necessários a qualquer momento durante a operação” (DECEA, 2017, p. 20).

Os RPAS têm sido usados para coleta de dados em inúmeras finalidades, como filmagens de eventos, levantamentos topográficos, inspeções de obras, atividades da agricultura de precisão e outros. Em alguns desses usos, percebe-se a integração dos dados coletados com fluxos da Fotogrametria e/ou do Sensoriamento Remoto para a geração de seus produtos.

Nessas atividades, os RPAS têm se constituído em uma verdadeira “tecnologia disruptiva”, permitindo a integração do posicionamento global com filmagens e fotografias aéreas, obtendo dados geoespaciais, de alta resolução espacial a custos competitivos. São serviços, produtos e aplicações há pouco tempo restritos, devido aos altos custos envolvidos na sua obtenção, a áreas específicas e que estão mais acessíveis para profissionais de diversos segmentos.

A literatura acadêmica dos estudos interdisciplinares do uso de RPAS ressalta a vantagem dos levantamentos de aerofotogrametria, via RPAS, permitirem uma maior agilidade na coleta de dados espaciais para seus projetos, possibilitando a revisita conforme a

¹ Capítulo publicado em forma de artigo: Lobo *et al.* (2020) - <<https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/56503>> Acesso em 14/09/2022

necessidade. Essa característica é evidenciada no caso dos cálculos da dinâmica de acúmulo de volume de pilhas de rejeito em mineração (SILVA, 2015); da possibilidade de uso na avaliação de impacto ambiental em caso de acidentes rodoviários (LONGHITANO, 2010) ou, ainda, na obtenção de valores de índices de vegetação, em diferentes fases do crescimento (ALVES JR., 2015).

Outros estudos ressaltam a capacidade de os levantamentos serem capazes de gerar produtos compatíveis com especificidades de qualidade pré-definidas nos projetos, em especial para a atualização cartográfica (MITISHITA *et al.*; 2014 LUZ, 2015). Há, ainda, pesquisas que apontam os usos dos produtos gerados pelos levantamentos, como no caso de inspeção de dutos (TEDESCO *et al.*, 2014) ou de elaboração de projetos viários (ALMEIDA, 2014).

Na análise de resultados, Cristhiano Luz (2015) difere da maioria dos trabalhos analisados, pois não gerou produtos cartográficos melhores que a escala 1:25.000 (PEC-PCD² Classe B) ou 1:50.000 (PEC-PCD Classe A), enquanto os resultados de outros autores são bem mais promissores, com produtos adequados às escalas de até 1/1000, PEC-PCD Classe A (FERREIRA, 2014; KOMAZAKI *et al.*, 2017).

A busca por trabalhos que diferenciem a execução de levantamento do tipo *GRID* (GRADE) ou *CORRIDOR* (CORREDOR) apontou a raridade do assunto em pesquisas nacionais e chegaram às pesquisas desenvolvidas pela Escola Politécnica Federal de Lausanne (Suíça), orientadas pelo pesquisador Jan Skaloud. Há uma, em especial, que investiga a possibilidade da obtenção direta da orientação externa das câmeras nas ARP pela implementação de sensores especiais e métodos de pré-calibração da câmera (REHAK; SKALOUD, 2015).

Independente dos diferentes resultados obtidos, os autores são unânimes em apontar a falta de confiabilidade nos dados da integração INS/GNSS no processo aerofotogramétrico por ARP, muito em razão da falta de precisão dos sensores embarcados na maioria dos equipamentos disponíveis no mercado. A implementação RTK e/ou PPK confere uma maior precisão aos dados GNSS, podendo melhorar o resultado dos dados integrados INS/GNSS (MORAES, 2016).

A coleta de dados via RPAS não é apropriada para toda situação, como apresentam os autores (1) MACLEAN (2015) e (2) MATESE *et al.* (2015), quando indicam seus resultados em relação à análise do custo/benefício no emprego de tais sistemas.

² Padrão de Exatidão Cartográfica dos Conjuntos Cartográficos Digitais, estabelecido pela Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais — ET/ADGV, (EB, 2011)

Para (1), a utilização de RPAS pode ser viável para coleta de dados em até 42 km²; enquanto para (2), essa área limite seria de 10 hectares (0,1 km²). A discrepância entre os resultados é devida à variação dos equipamentos utilizados, bem como dos diferentes métodos e finalidades dos produtos finais gerados pelos autores.

Essa breve comparação aponta uma característica da utilização de RPAS para Fotogrametria e Sensoriamento Remoto: a grande variedade de aplicações ocasiona um igual número de resultados (produtos e serviços) e de métodos possíveis para a geração e coleta de dados. Salienta-se a importância de verificar os casos nos quais a coleta tem sido utilizada, analisando o emprego do sistema e avaliando os casos em que se obteve sucesso, bem como as indicações de seus limites.

O presente trabalho é o resultado de uma revisão bibliográfica sistemática de trabalhos nacionais acerca da coleta de imagens via RPAS para a geração de dados geoespaciais por fluxos de Fotogrametria e/ou de Sensoriamento Remoto, focando na compreensão dos produtos e serviços gerados, bem como nos métodos e equipamentos utilizados pelos diversos autores.

2.1 Materiais e Métodos

Segundo Ravindran e Shankar (2015, p. 3), “revisões (bibliográficas) sistemáticas são caracterizadas por uma questão explícita, definida claramente para o rastreamento e inclusão de estudos e implicações para futuras pesquisas.”

Para a busca, realizada ao longo do mês de maio de 2019, utilizou-se a plataforma digital pública da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o buscador aberto Google Scholar. A combinação adotada dos termos foi “monografia, dissertação, teste, rpa, drone, vant, fotogrametria, sensoriamento remoto”, com um recorte temporal de 10 anos (2008-2018). A metodologia da revisão pode ser resumida pelo fluxograma da Figura 2.1.

Selecionaram-se monografias publicadas por instituições brasileiras de ensino e pesquisa, a partir de 2008 (ano-base) incluídas nas seguintes categorias: graduação de nível superior (bacharelado, licenciatura ou tecnológico); mestrado (acadêmico ou profissional); doutorado (acadêmico ou profissional); que apresentaram geração de dados geoespaciais obtidos por fluxos de Fotogrametria e/ou de Sensoriamento Remoto e que utilizaram ARP na coleta de dados.

O ano-base foi escolhido tendo como limite as publicações com até 10 anos do

período de estudo (2008-2018), sendo que a publicação mais antiga encontrada para o período é de 2010.

Figura 2.1- Fluxograma simplificado do método empregado na revisão



Fonte: Lobo *et al.* (2020).

Os resultados foram encontrados, via de regra, nos portais das “Bibliotecas de Repositório de Publicações” das diferentes universidades; no repositório da Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações ou, ainda, no catálogo de dissertações e teses da CAPES. Nem todo trabalho publicado pelos centros de pesquisa das universidades estava disponível para acesso via internet. Só foram contabilizados os arquivos on-line disponíveis para *download* no período de busca da pesquisa (27 a 31/5 de 2019).

A seleção dos trabalhos para inclusão na revisão seguiu POPAY *et al.* (1998) (*apud* LOUREIRO *et al.* (2016), que indica que a avaliação deve verificar se os trabalhos atendem aos seguintes pontos:

- a) O estudo ilumina o significado subjetivo, as ações e o contexto do que está sendo pesquisado;
- b) Há evidência de adaptação e resposta do projeto de pesquisa a necessidades e problemas oferecidos pela vida real;
- c) O estudo produz o tipo de conhecimento necessário para compreender a estrutura e o processo no qual está localizado;
- d) São fornecidas descrições suficientemente detalhadas que permitam ao pesquisador interpretar o significado e contexto do que está sendo pesquisado;

e) Como a pesquisa se desenvolve da apresentação e análise dos dados até a descrição dos resultados e conclusões;

f) Diferentes fontes de conhecimento sobre a mesma questão são comparadas e contrastadas;

g) Podem ser extraídas generalizações das conclusões oferecidas para outras áreas do conhecimento, ou para diferentes populações ou grupos; e

h) A relevância da pesquisa está claramente indicada.

A análise dos trabalhos resultou em três diferentes níveis de adequação das monografias, sendo (1) adequadas; (2) adequadas em parte e (3) inadequadas.

O conjunto das “Monografias Incluídas na Revisão” foi formado pelos trabalhos identificados como “Adequadas” e “Adequadas em parte” (níveis 1 ou 2).

Nesse conjunto, foram avaliados 11 parâmetros booleanos relativos aos produtos gerados e métodos utilizados. Tal avaliação foi realizada em função da presença ou ausência dos seguintes tópicos (codificados pelas siglas em parênteses):

a) (BL) Indica as **Bases Legais** para coleta de dados via ARP;

b) (AF) Utiliza aeronave “**Asa-Fixa**” para coleta dos dados;

c) (AR) Utiliza aeronave “**Asas Rotativas**” para coleta dos dados;

d) (CL) Aplica **Correção** das distorções das **Lentes** para o processamento fotogramétrico;

e) (PC) **Planeja** a coleta em “**Corredores**” (em contrapartida de “Blocos”);

f) (NC) Utiliza **Normas Cartográficas** para verificação dos produtos gerados;

g) (PR) Implementa **Pontos de Referência** (controle ou checagem) na coleta ARP;

h) (TR) Usa posicionamento relativo GNSS em **Tempo Real** (RTK) para controle da ARP;

i) (VC) Processa dados por algoritmo SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*), SfM (*Structure from Motion*) ou similar (**Visão Computacional**);

j) (CT) **Compara** dados obtidos aos de **Topografia**, fotogrametria ou imageamento terrestre;

k) (CA) **Compara** dados obtidos às de imagens **aéreas**, orbitais ou similares.

Além dos parâmetros booleanos foram coletados os seguintes dados quantitativos dos trabalhos incluídos na revisão:

a) (TIPO) Nível do trabalho de monografia (Graduação, Mestrado ou Doutorado);

b) (ANO) Ano da publicação;

c) (AREA) Área de concentração do centro de pesquisa da publicação;

- d) (ESTADO) Sigla do Estado da União em que o centro de pesquisa se encontra;
- e) (INSTITUICAO) Sigla da Universidade em que o centro de pesquisa se encontra;
- f) (CHAVE) Agrupamento pela aplicação principal do trabalho;
- g) (TITULO) Título da monografia;
- h) (AUTOR) Sobrenome e nome do primeiro autor do trabalho;
- i) (FAIXA) Faixa espectral do sensor utilizado;
- j) (GSD) Valor, em centímetros, do *Ground Sample Distance* (i. e., tamanho do pixel);
- k) (BANDAS) Quantidade de bandas espectrais coletadas no trabalho.

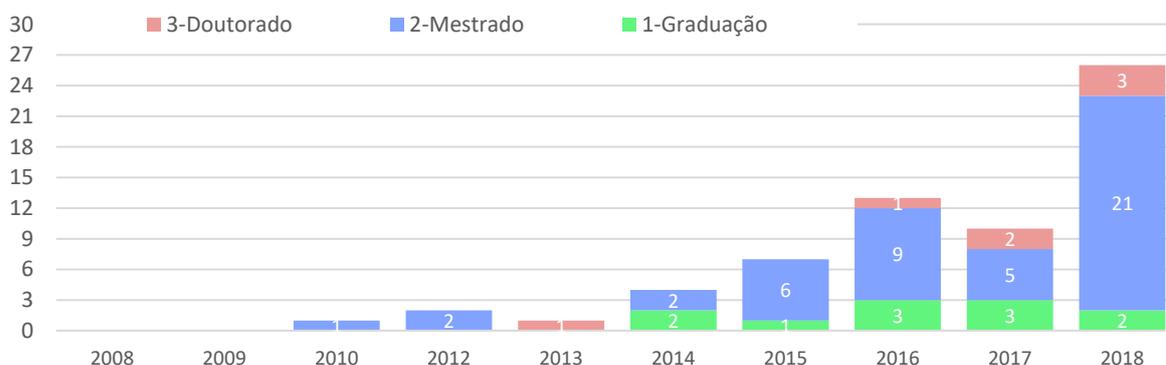
2.2 Resultados e discussões

Houve a recuperação de 91 trabalhos que estavam disponíveis para *download* com as características definidas, formando o conjunto “Monografias Seleccionadas”. Da análise desse conjunto, classificaram-se 64 trabalhos para as “Monografias Incluídas na Revisão”, sendo 34 “Adequadas” e 30 “Adequadas em parte”. Os 27 trabalhos restantes foram excluídos das análises, por terem sido considerados “Inadequados” para a revisão.

Com o ano-base definido para 2008, o primeiro trabalho data de 2010 e há uma quantidade crescente ao longo dos anos avaliados, chegando a 26 trabalhos em 2018. A distribuição dos tipos de monografias revisadas apresenta uma grande concentração de publicações de mestrado, com 46 trabalhos (~72%); seguida dos trabalhos de graduação, que totalizaram 11 (~17%) e dos de doutorado, com 7 (~11%).

A Figura 2.2 apresenta a distribuição dos trabalhos revisados, relacionando os tipos e anos de publicação.

Figura 2.2 - Distribuição dos tipos de trabalhos revisados no período de 2008-2018

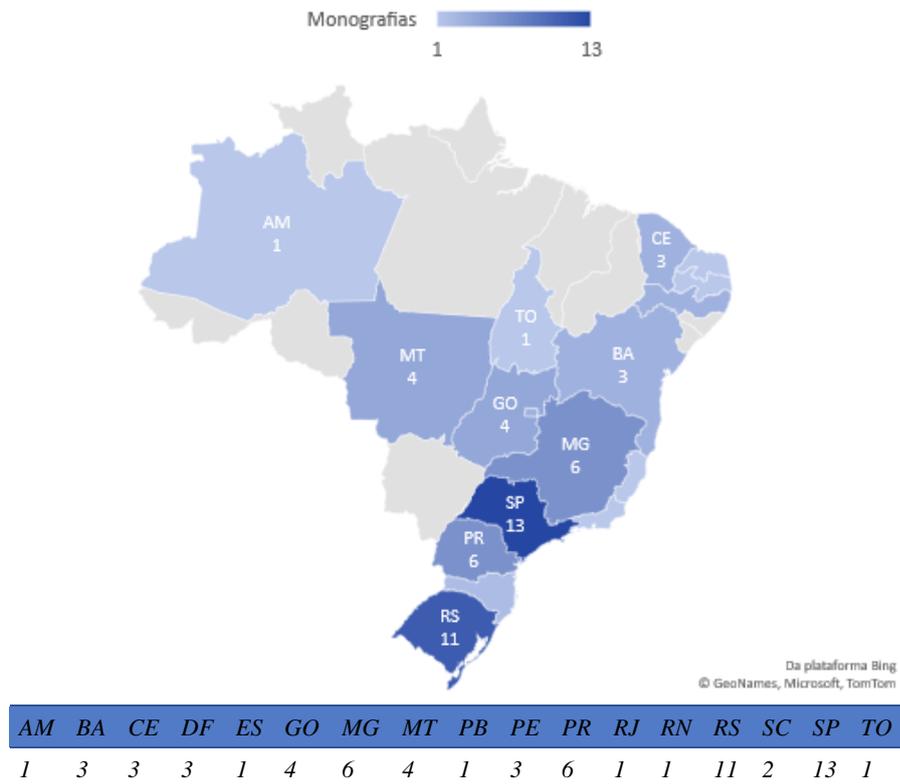


Fonte: Lobo *et al.* (2020).

Foram revisadas monografias de todas as regiões do Brasil, sendo 21 da região Sudeste (~32%); 19 da região Sul (~21%); 11 da região Centro-Oeste (~17%); 11 da região Nordeste (~17%); e 2 monografias da região Norte (~3%).

A Figura 2.3 apresenta a quantidade de trabalhos avaliados pelos estados do Brasil.

Figura 2.3 - Distribuição das monografias avaliadas ao longo do território nacional

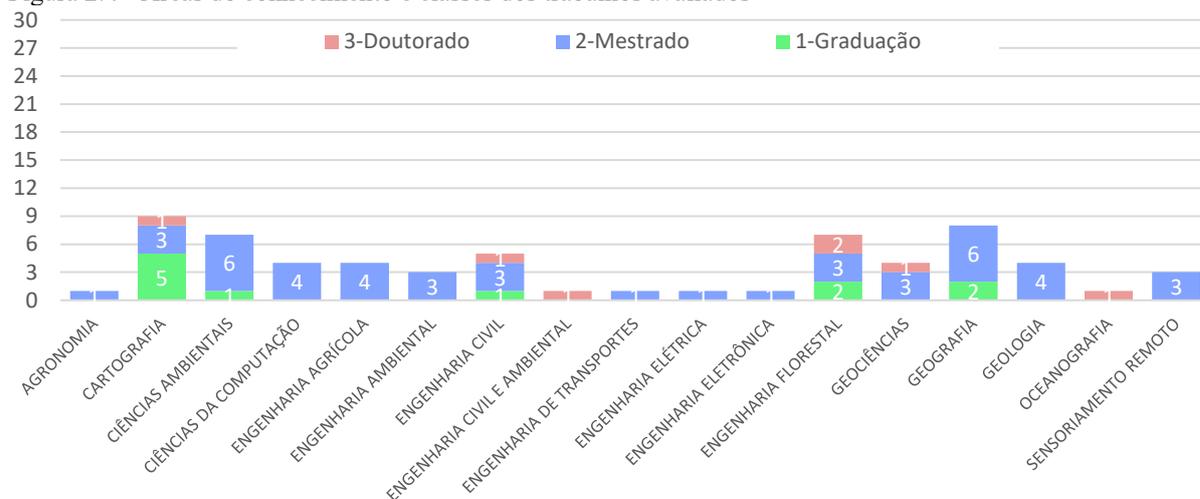


Fonte: Lobo *et al.* (2020)

A análise sobre a diversidade das áreas de conhecimento das monografias destaca as áreas de Cartografia (9 monografias); Geografia (8); Engenharia Civil (5); Engenharia Florestal (7) e Ciências Ambientais (7) que, somadas, concentram mais de 55% dos trabalhos revisados, totalizando 36 monografias.

A Figura 2.4 relaciona as classes das monografias com as áreas de conhecimento em que estão inseridas.

Figura 2.4 - Áreas do conhecimento e classes dos trabalhos avaliados



Fonte: Lobo *et al.* (2020)

As principais aplicações identificadas na avaliação das monografias foram agrupadas em seis classes (campo CHAVE):

a) **CADASTRO**, em que as monografias enfocam os estudos para geração e aplicação de dados em escala cadastral (1/10.000, ou maiores);

b) **GENERALIDADES**, em que as monografias enfocam os estudos que não puderam ser classificados nos outros grupos;

c) **INSPEÇÃO**, em que as monografias enfocam os estudos para executar inspeções com os produtos obtidos;

d) **MDS / MDT**, em que as monografias enfocam os estudos para a geração e verificação de modelos digitais de superfície e/ou terreno;

e) **QUALIDADE**, em que as monografias enfocam os estudos para a verificação da qualidade dos produtos gerados e/ou dos sistemas utilizados;

f) **VEGETAÇÃO**, em que as monografias enfocam os estudos para geração e aplicação de dados no mapeamento e classificação da cobertura vegetal.

A quantidade de trabalhos identificados em cada grupo está na Tabela 2.1.

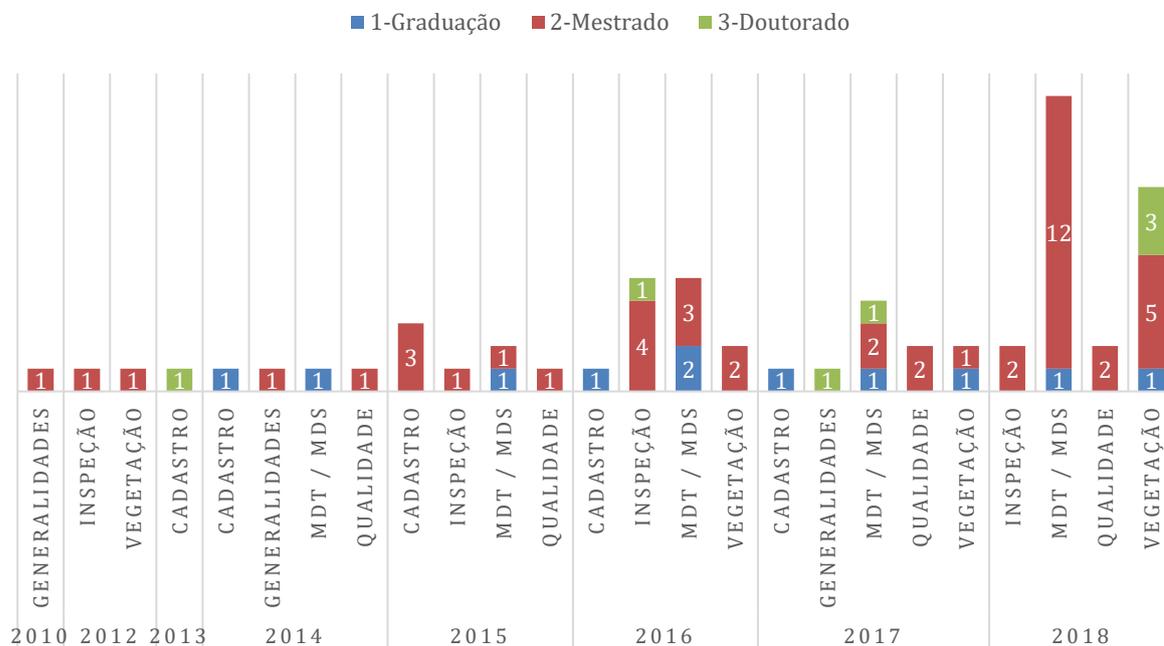
Tabela 2.1 - Quantidade de trabalhos de acordo com as aplicações dos estudos.

Aplicações-CHAVE	Percentual do total	Contagem
CADASTRO	10,94%	7
GENERALIDADES	4,69%	3
INSPEÇÃO	14,06%	9
MDT/MDS	39,06%	25
QUALIDADE	9,38%	6
VEGETAÇÃO	21,88%	14

Fonte: Lobo *et al.* (2020)

A distribuição ao longo dos anos das aplicações-chave dos trabalhos pelas classes das monografias é apresentada na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Aplicações e classes dos trabalhos ao longo dos anos.



Fonte: Lobo *et al.* (2020)

2.3 Avaliação dos parâmetros

2.3.1 (BL) Indica as bases legais para coleta de dados via ARP

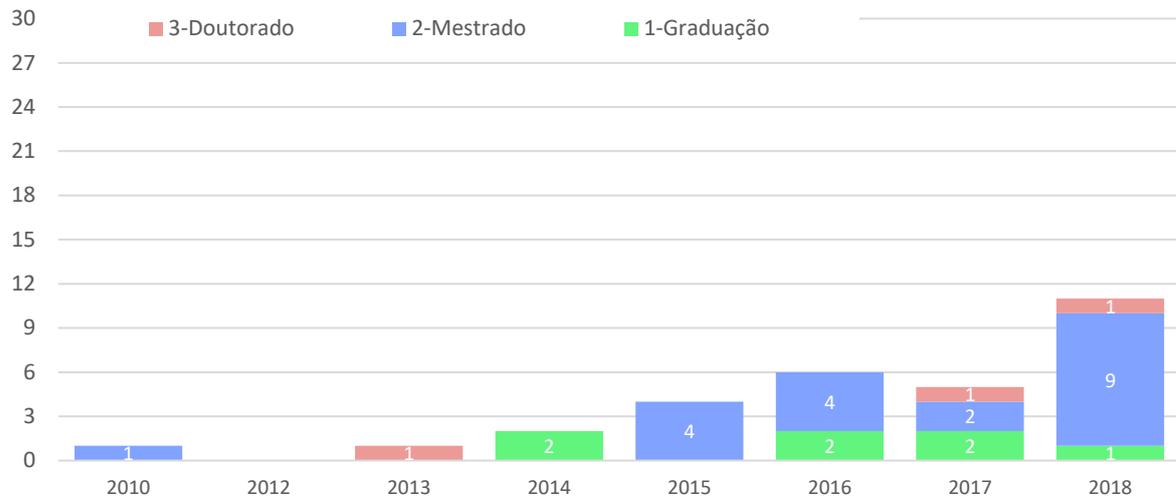
Cerca de 46% dos trabalhos (30 monografias) apresentam as bases legais para uso de ARP. Os trabalhos citam as exigências e deliberações de três órgãos para o uso de ARP no Brasil:

- ANATEL, para o registro e homologação do sistema de comunicação da ARP;
- DECEA, para o registro e acesso ao espaço aéreo na utilização da ARP;
- ANAC, para o registro e/ou homologação da aeronave.

Tais legislações têm sofrido alterações ao longo dos últimos anos. Cada monografia apresenta aquela que estava em vigor à época de sua elaboração.

Apresenta-se na Figura 2.6 a distribuição dos trabalhos com (BL) nas classes de monografias, ao longo dos anos.

Figura 2.6 - Bases Legais (BL) nas monografias.



Fonte: Lobo *et al.* (2020).

2.3.2 (AF) e (AR) Indicam o tipo de aeronave utilizada na coleta dos dados

Apenas um trabalho, de 2018, para avaliação de erosão com a geração de MDT/MDS, apresentou resultados com uso simultâneo de aeronaves asa-fixa (AF) e asa rotativa (AR) — todos os outros usaram um ou outro tipo de aeronave. A falta de dados coletados por um ou outro tipo de aeronave foi percebida somente na monografia de 2010 — que apresentou de forma geral e teórica as aplicações possíveis para ambos os tipos de aeronaves. A distribuição apresentou 26 monografias “AF” (~41%) e 38 monografias “AR” (~59%).

Todos os equipamentos utilizados se encaixam na Classe 3 da legislação da ANAC, com peso máximo de decolagem menor ou igual a 25kg (ANAC, 2017). Essa classe é conhecida como de microvants; a classe 2 refere-se às plataformas com peso total entre 25kg e 150kg, enquanto a classe 1 é destinada às plataformas com peso total superior a 150kg. A presença massiva dos equipamentos Classe 3 pode ser explicada pelo menor custo de aquisição dos equipamentos; pelas facilidades de operação que tais equipamentos apresentam e pela simplificação que há na legislação para a legalização do uso de equipamentos desse tipo.

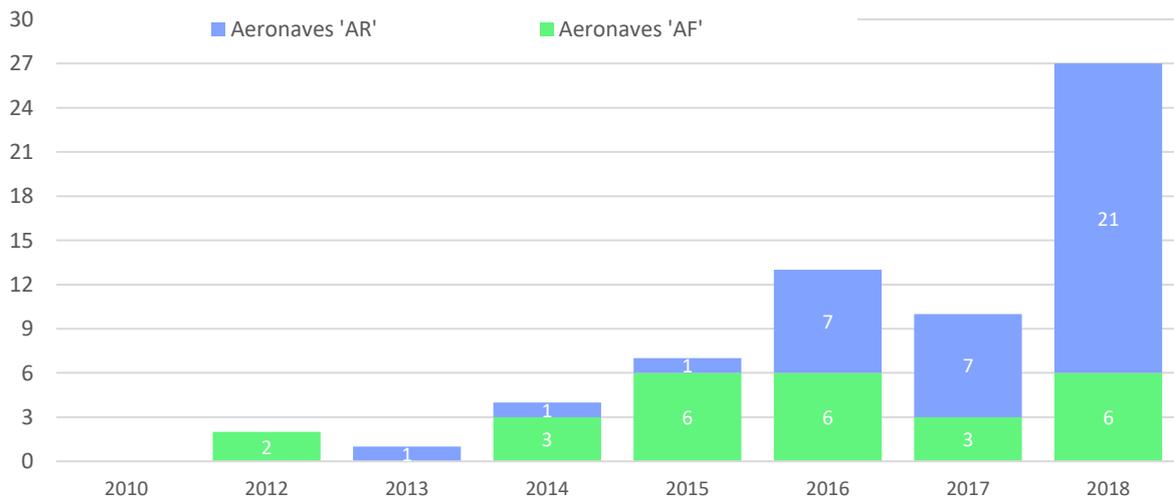
No caso da utilização de aeronaves com asa rotativa (multirrotor), a maioria dos trabalhos apresenta o uso de quadricópteros com alimentação via bateria e autonomia de voo variando entre 15 e 35 minutos. As envergaduras das aeronaves de asa-fixa não foram maiores do que 2,5 metros de comprimento, com alimentação via bateria ou à combustão e autonomia, apresentada pelos autores, entre 30 minutos e 2 horas de voo.

O fabricante de equipamentos mais citado nas monografias, para o caso das asas rotativas (AR), foi a chinesa “DJI”, presente em 26 trabalhos (~68% dos AR). Outros oito trabalhos (~21% dos AR) apresentaram os dados coletados por equipamentos genéricos — desenvolvidos pelos próprios autores ou por empresas sem marca registrada.

Para o caso dos asas-fixas (AF), o fabricante “SenseFly” foi o mais citado, em doze trabalhos (~44% dos AF). O uso de equipamentos desenvolvidos pelos próprios autores ou por empresas sem marca registrada foi identificado em outros sete trabalhos (~21% dos AF). Há, ainda, a presença de equipamentos desenvolvidos por empresas nacionais, como a Xmobots; AGX (já extinta) e NuvemUAV, somando outras oito monografias (~29% dos AF).

A Figura 2.7 distribui os tipos de aeronaves utilizadas ao longo dos anos (em 2018 há um único trabalho que usou tanto “AR” quanto “AF” e 2010 o único trabalho que não utilizou nenhum tipo).

Figura 2.7 - Tipos de aeronaves utilizadas nas monografias ao longo dos anos.



Fonte: Lobo *et al.* (2020)

2.3.3 (CL) Correção das distorções das lentes para o processamento fotogramétrico

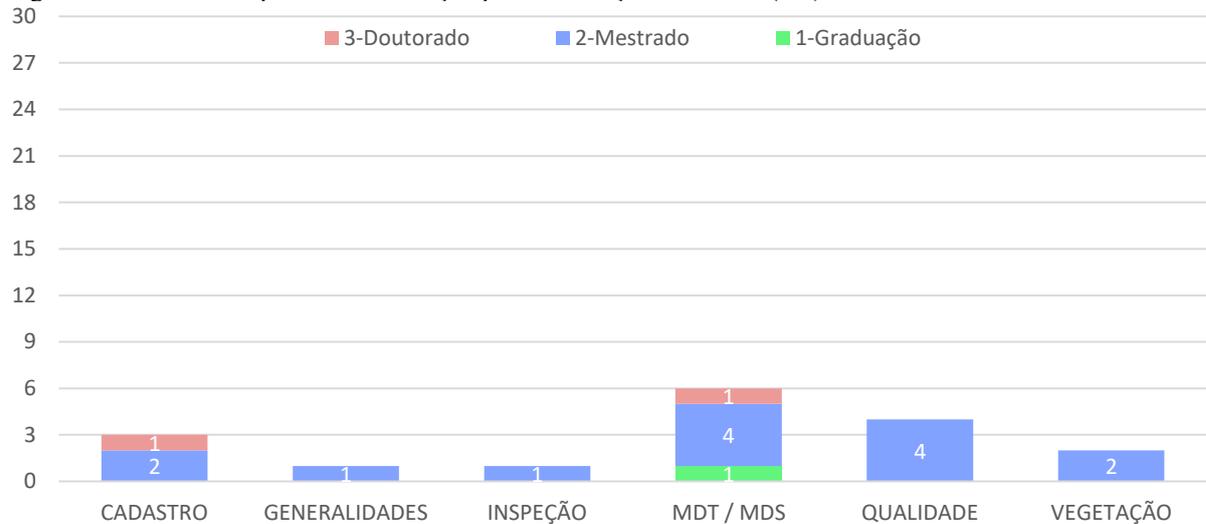
Todos os trabalhos revisados apontaram o uso de câmeras fotográficas de pequeno formato, não métricas, na coleta dos dados. Essas características sugerem o uso de técnicas de correções de erros sistemáticos, causados por distorções das lentes, no próprio processamento fotogramétrico (CÔRTEZ, 1998; 2010).

Quanto à faixa espectral dos sensores, a maioria dos trabalhos utilizou sensores imageadores passivos no espectro do visível (RGB) para obtenção dos dados. Houve casos de trabalhos que utilizaram câmeras hiperespectrais; outros que usaram câmeras multiespectrais,

com acesso à faixa do infravermelho. Outros, ainda, tiraram partido de sensores ativos de emissão de LASER, com equipamentos do tipo LIDAR (*Light Detection and Ranging*) para a obtenção de dados. Do conjunto de monografias revisadas, 18 trabalhos (~28%) apontaram a realização de alguma pré-calibração para a obtenção dos parâmetros de orientação das lentes, visando corrigir erros causados pelas lentes no processamento dos dados.

A Figura 2.8 indica a distribuição dos trabalhos que citam a correção das lentes (CL) pelas finalidades dos trabalhos.

Figura 2.8 - Trabalhos que citam a correção para a distorção das lentes (CL).



Fonte: LOBO *et al.* (2020).

2.3.4 (PC) Planeja a coleta em “Corredores” (em contrapartida de “Blocos”)

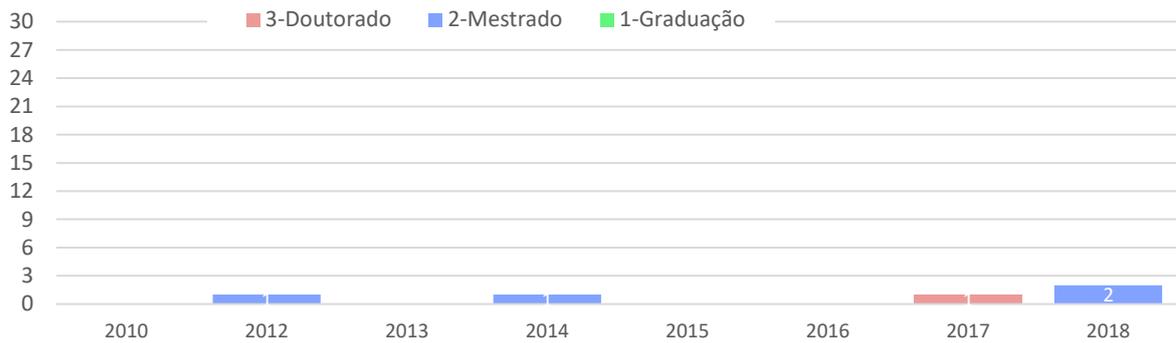
Os trabalhos “PC” apresentaram predominantemente dados coletados em trechos pequenos, com linhas de voo na casa das centenas de metros, cobrindo áreas de até algumas dezenas de hectares.

Houve casos em que as linhas de voo chegaram a alguns poucos quilômetros (máximo de 5km), cobrindo áreas de até uma dezena de quilômetros quadrados.

Considerou-se coletas em “Corredor” aquelas que foram planejadas para ter de uma a três faixas de voo e cujo comprimento da área de cobertura fosse de, no mínimo, quatro vezes maior que a largura — formando o esboço de uma figura linear.

Identificaram-se cinco trabalhos (~8%) que apresentaram esse tipo de planejamento para a coleta. A Figura 2.9 aponta os tipos e os anos desses trabalhos.

Figura 2.9 - Trabalhos que apresentaram planejamento em Corredores (PC).



Fonte: LOBO *et al.* (2020).

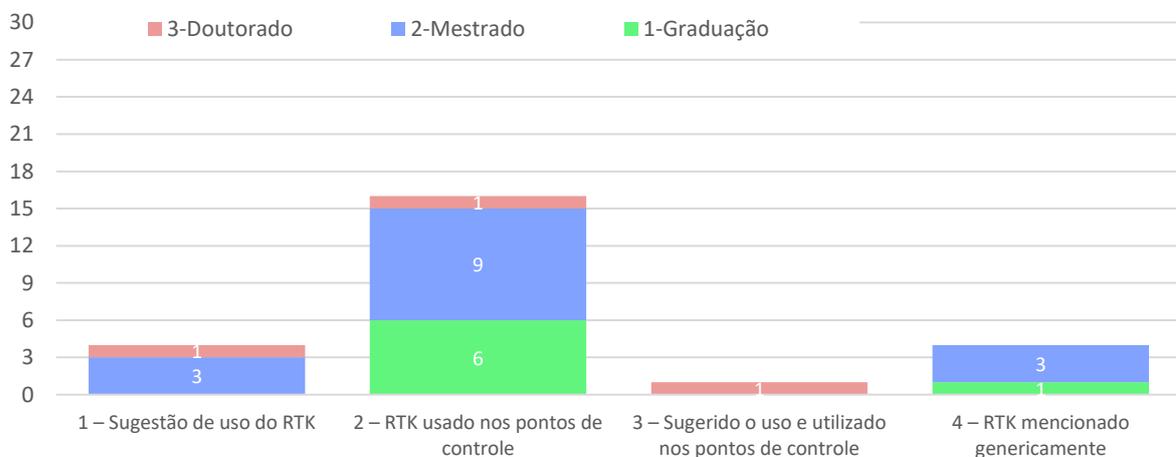
2.3.5 (TR) utiliza posicionamento relativo GNSS em tempo real (RTK) para controle do RPA

Nenhuma monografia utilizou o posicionamento cinemático relativo GNSS em tempo real (RTK - *Real Time Kinematic*) para o controle da ARP (chave “TR”).

A grande maioria dos trabalhos, 40 monografias (~62%), nem cita o termo RTK. Ainda assim, foram identificados cinco trabalhos em que os autores sugeriram essa investigação; quatro em que esse tipo de coleta é citado de forma genérica e 17 em que a técnica RTK foi utilizada na coleta de pontos de controle.

A Figura 2.10 apresenta a distribuição dos trabalhos em que o posicionamento RTK é citado, sugerido ou utilizado para os pontos de controle nos tipos de monografias em que foram identificados.

Figura 2.10 - Trabalhos que citam o termo 'RTK'.



Fonte: LOBO *et al.* (2020).

2.3.6 (NC) Utiliza normas cartográficas para verificação dos produtos gerados e (PR) implementa pontos de referência

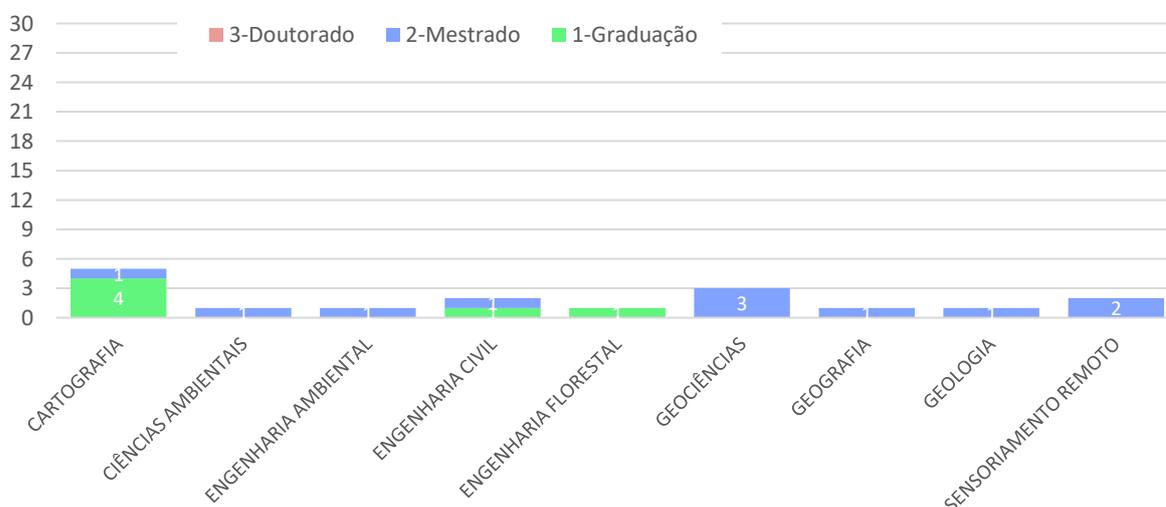
A qualidade dos produtos cartográficos (NC) das monografias foi verificada pelo “Padrão de Exatidão Cartográfico”, PEC (BRASIL, 1984) ou pelo “Padrão de Exatidão Cartográfico dos Produtos Cartográficos Digitais”, PEC-PCD (EB, 2011), ora por um ou outro, ora por ambos. A maioria das coordenadas dos pontos de referência foi determinada através de posicionamento relativo GNSS, utilizando receptores de dupla frequência (L1/L2) que, eventualmente, eram compatíveis com o método de posicionamento RTK.

Houve trabalhos que implementaram pontos de controle e/ou de checagem através do serviço de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) do IBGE. Outros determinaram as coordenadas de seus pontos de interesse através de posicionamento absoluto, com receptores de navegação.

As 17 das monografias (~26%) que apresentaram a verificação dos produtos pelas normas cartográficas (NC) implementaram seus pontos de controle e/ou de checagem através de posicionamento relativo e uso de receptores GNSS de dupla frequência, sendo que em sete dessas foi utilizado o método RTK. Outras 23 monografias programaram pontos de referência para outros fins ou não apresentaram a qualidade dos produtos pelas normas cartográficas, totalizando 40 trabalhos (~63%), onde há a presença do parâmetro “PR”.

A Figura 2.11 apresenta os trabalhos que verificaram os produtos de acordo com as orientações das normas cartográficas (NC), correlacionado os tipos das monografias e suas áreas.

Figura 2.11 - Monografias em que se verifica a qualidade dos produtos por normas cartográficas (NC).



Fonte: LOBO *et al.* (2020).

2.3.7 (VC) Processa dados por algoritmo SIFT, SfM ou similar (Visão Computacional)

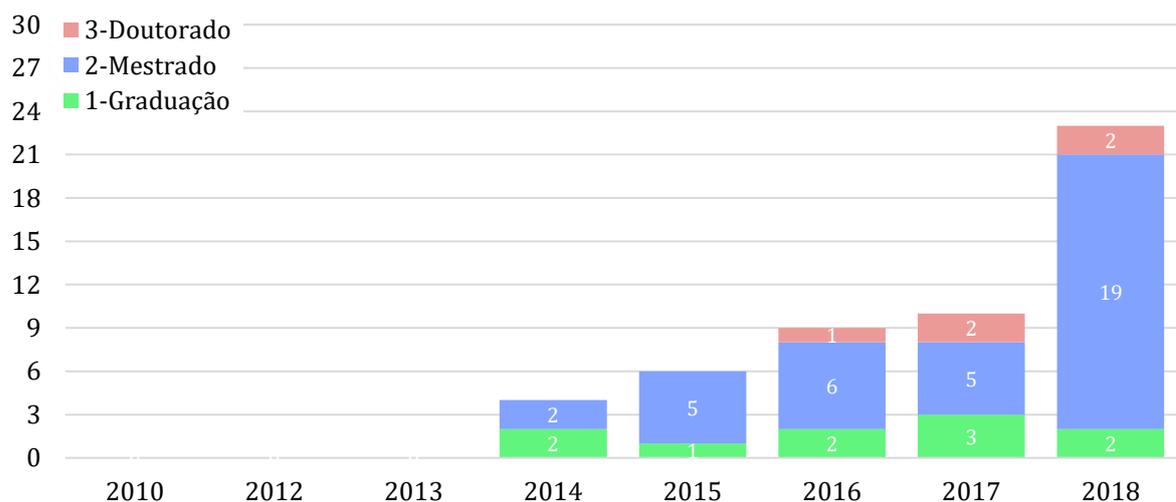
O uso de software dotado de algoritmos de visão computacional para a geração de dados (VC) apresentou-se em aproximadamente 82% das monografias avaliadas (53 trabalhos). A maioria dos autores utilizou o aplicativo computacional AGISOFT PHOTOSCAN (atualmente, comercializado como METASHAPE) nos processamentos, tendo também sido observado o uso do programa PIX4D Mapper em algumas monografias.

Ambos usam o algoritmo SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) na obtenção das distâncias entre o ponto central da lente da câmera e os pontos de um objeto imageado. A técnica usada para a determinação dessas distâncias é aquela do campo da visão computacional, conhecida pela sigla SfM (*Structure from Motion*), uma “forma passiva para determinar múltiplos pontos tridimensionais de objetos que estejam em áreas sobrepostas por duas imagens bidimensionais sequenciais” (adaptado de MOONS, 2008). Ou seja, segue o princípio da estereoscopia, utilizado pela aerofotogrametria tradicional.

Enquanto a maioria dos trabalhos realizou um processamento automatizado através dos parâmetros *default* dos programas, alguns autores aplicaram filtros nas imagens e usaram opções avançadas na geração dos resultados.

A Figura 2.12 aponta a evolução da presença desse tópico ao longo do tempo.

Figura 2.12 - Uso de visão computacional nas monografias.



Fonte: LOBO *et al.* (2020).

2.3.8 (CT): Compara dados obtidos com os de topografia, fotogrametria ou imageamento terrestre; e (CA): Compara dados obtidos com imagens aéreas, orbitais ou similares

A maioria dos produtos gerados pelos autores é imagem do tipo raster e a resolução espacial dos produtos finais (tamanho do pixel) variou entre 1,5cm e 1,9 m. Foram observados dois trabalhos em que o tipo de saída foi exclusivamente vetorial.

A maioria utilizou sensores imageadores do tipo passivo, captando a faixa espectral do visível e, em alguns casos, do infravermelho próximo. Percebeu-se uns poucos casos de uso de sensores passivos hiperespectrais (com capacidade de captar dados em centenas de bandas na faixa de 400nm a 900nm) e, ainda, de sensores ativos, do tipo LIDAR (*Light Detection and Ranging*).

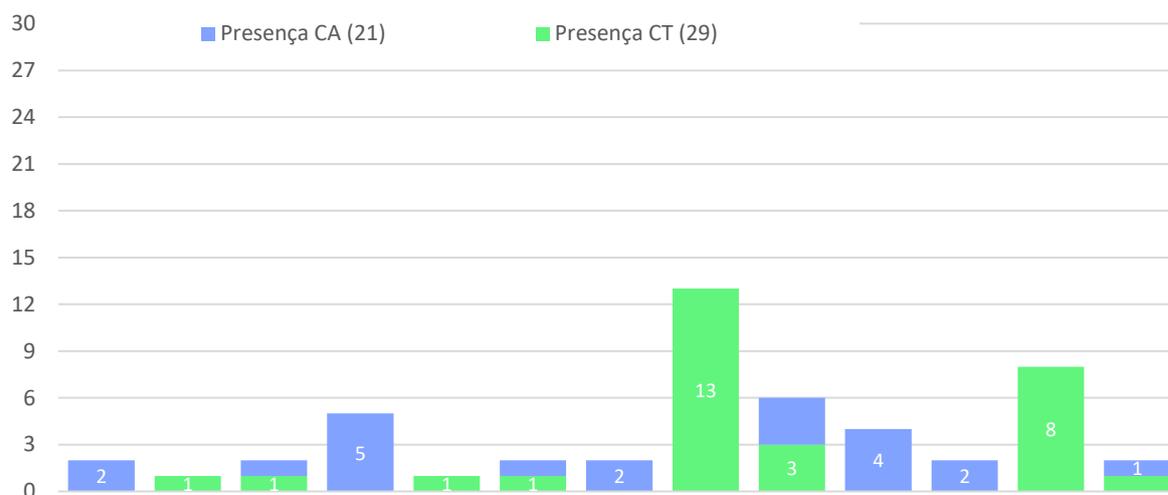
Das 21 monografias (~32%) que compararam os dados gerados a imagens aéreas ou similares (CA), seis também compararam os dados com informações de topografia, fotogrametria ou imageamento terrestre (CT). Outros 23 trabalhos compararam seus dados somente com informações coletadas em terra, totalizando 29 trabalhos (~46%), com a presença do parâmetro “CT”. Ao todo, 44 (~69%) trabalhos apresentaram CA ou CT.

No caso das monografias “CA”, ganham destaque (pelo número de vezes que foram citadas) as imagens da plataforma *Google Earth*, as imagens da série LANDSAT e as imagens de relevo do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Também foram feitas comparações com dados coletados por voos tripulados, em especial com uso de sensores LIDAR.

Nas comparações com dados de levantamentos terrestres (CT), a maioria das monografias usou a topografia associada ao posicionamento GNSS, obtendo feições do terreno e/ou de edificações que foram comparadas àquelas geradas pelo processamento dos dados obtidos por ARP.

A Figura 2.13 apresenta a distribuição dos trabalhos com o parâmetro “CT” pelas áreas de conhecimento e principais finalidades das monografias revisadas.

Figura 2.13 - Comparações com outros dados nas monografias (CA/CT) em suas aplicações.



Fonte: LOBO *et al.* (2020).

2.4 Desafios e perspectivas futuras do uso de ARP para aerofotogrametria

Para as perspectivas futuras das soluções obtidas por ARP, destaca-se o contínuo desenvolvimento da tecnologia embarcada que, associada a uma possível melhoria da infraestrutura de transmissão de dados — com uma maior e melhor distribuição da tecnologia celular 4G e a futura implementação da tecnologia celular 5G —, há de demandar soluções de processamento embarcado nas aeronaves. Isso permitirá a obtenção de informações confiáveis de forma mais rápida e com melhores resoluções espaciais e radiométricas. Nesse sentido, ganha destaque a popularização, com a diminuição dos custos de aquisição, dos sensores LIDAR (*Light Detection and Ranging*); dos sensores de medição de atitude mais precisos (IMU); dos sensores de posicionamento GNSS de múltipla frequência e dos sensores imageadores multiespectrais e hiperespectrais.

Esse futuro há de exigir, ainda, o desenvolvimento de uma nova linha de processadores embarcados nas aeronaves que, aliados a sistemas computacionais baseados em aprendizagem de máquina e inteligência artificial, serão capazes de processar os dados e ter um consumo de bateria compatível com as demandas da atividade. A bateria em si, aliás, é um desafio a ser vencido: com os equipamentos demandando cada vez mais autonomia e capacidade de processamento, as baterias deverão ser capazes de manter a carga por mais tempo e ter um peso que não onere muito a sustentação das ARP, em especial no caso de equipamentos de asa rotativa.

A manter o contínuo aumento pelo interesse por soluções baseadas em coleta por

ARP (bem como por outros sistemas remotamente pilotados — terrestres, aquáticos etc.), as instituições regulamentadoras devem estar preparadas para essa crescente demanda, tanto em termos de pessoal, capacidade computacional e ferramentas de fiscalização, sendo esse um desafio a ser enfrentado pelo poder público. O Estado deve atualizar as normas que norteiam a produção dos produtos. A disseminação de produtos para várias áreas do conhecimento, em especial nas engenharias, exige que os produtos sejam normatizados. Acontece que as atuais normas, por vezes, se encontram pouco adequadas aos produtos digitais gerados pelos processos, sendo por vezes reinterpretadas por cada órgão produtor de dados geoespaciais.

Nesse sentido, seria urgente uma atualização das normas técnicas da Cartografia Nacional, que data de meados da década de 1980, pelo Decreto nº 89.817 de 20 de julho de 1984. Isso poderia embasar a atualização de inúmeras normas técnicas de órgãos e institutos geradores de dados geoespaciais. Um bom exemplo é o DNIT, que baseia os projetos em normativa de 2006 — época em que a aerofotogrametria era analógica e extremamente restrita em seus custos — e, hoje, tem esboçado uma tentativa de atualizar as exigências técnicas para aceitar dados coletados por ARP em seus fluxos de projetos.

2.5 Conclusões

Esta investigação apresenta um panorama acadêmico dos diferentes usos de ARP para Fotogrametria e Sensoriamento Remoto no Brasil ao longo de 10 anos (2008-2018). Tais trabalhos, tanto no nível de graduação quanto de pós-graduação, indicam uma tendência de crescimento do uso dessa tecnologia, bem como as áreas de conhecimento e finalidades mais procuradas no país, refletindo o nível de aprendizado e investimentos nas universidades públicas e privadas. Evidentemente, uma parcela considerável desses estudos foi publicada em periódicos especializados, nacionais e internacionais, ajudando a disseminar o conhecimento e os avanços científicos.

Há grande variedade de aplicações para as ARP, com uso de equipamentos que devem ser escolhidos de acordo com as finalidades pretendidas e dos recursos disponíveis para a aquisição deles. Os custos de aquisição dos equipamentos usados nas pesquisas avaliadas variam de aproximadamente US\$ 500,00 até os que superam facilmente os US\$ 100.000,00.

Os órgãos reguladores para uso profissional de ARP no Brasil, a citar a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), Ministério da Defesa (MD), Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), têm investido na simplificação e modernização dos processos, legislações e sistemas. Nesse sentido,

vale ressaltar as iniciativas da ANAC, com o Sistema de Aeronaves Não Tripuladas (SISANT) para o registro dos equipamentos, e do DECEA, na implementação do sistema de Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARPAS), para utilização do espaço aéreo (vulgo NOTAM). Vale ressaltar os esforços de atualização da legislação, com a recente edição e publicação do documento “Compêndio de legislações e questões técnicas e legais sobre aerolevanteamento” (MD, 2020) por parte do Ministério da Defesa e pela atualização, válida a partir de primeiro de julho de 2020, da legislação do acesso ao espaço aéreo por parte do DECEA.³

O controle das aeronaves através dos sistemas GNSS, que usam o método de posicionamento RTK, não apareceu em nenhum dos trabalhos avaliados, ainda que alguns autores apontem essa implementação como uma possível solução para melhorar a qualidade posicional no processamento dos dados, implementando a técnica do Georreferenciamento Direto. Como exemplo, pode-se citar a PIX4D, fabricante de software para processamento fotogramétrico de dados ARP, ao oferecer 3 soluções de posicionamento: implementação RTK; uso de pontos de controle; e pós-processamento dos dados do receptor (PPK) (PIX4D, 2018).

Boa parte dos estudos analisados foi feita em uma cobertura de voo planejada de “Bloco”, e não em “Corredor”. Os poucos trabalhos que coletaram dados em “Corredores” não ultrapassaram de 5 km de extensão nas linhas de voo. Os estudos que avaliam a qualidade cartográfica dos produtos gerados não são conclusivos, pois não é possível verificar uma consistência ou padrão nas metodologias das análises realizadas pelos autores. Há indicações de que a qualidade não seria superior a “Classe B”, em escalas 1/10.000, ainda que com produtos similares aos gerados por autores que classificaram os mapeamentos como “Classe A” (PEC-PDC) em escalas desde 1/1000 até 1/2500.

Os resultados indicam que de fato há lacunas para a contribuição no fenômeno avaliado, com questões em aberto que podem ser respondidas pela Tese.

2.6 Lista das monografias revisadas

Ordem alfabética das monografias revisadas neste trabalho, composta pelos dados: CONTAGEM; AUTOR; ANO; **TITULO**; TIPO; AREA; INSTITUICAO; ESTADO > GERAL.

³ A legislação mais recente está disponível em <https://www.decea.gov.br/drone/>, acesso em 02/07/2020.

1. ALENCAR, Pedro; 2018; **MEDIÇÃO E MODELAGEM DE VOÇOROCAS NO BIOMA CAATINGA: O CASO DA BACIA REPRESENTATIVA DE MADALENA, CE**; 2-Mestrado; ENGENHARIA AGRÍCOLA; UFC; CE > *MDT / MDS*
2. ALMEIDA, Danilo; 2018; **ASSESSING TROPICAL FOREST DEGRADATION AND RESTORATION THROUGH LIDAR REMOTE SENSING**; 3-Doutorado; ENGENHARIA FLORESTAL; USP; SP > *VEGETAÇÃO*
3. ALMEIDA, Igor; 2014; **ESTUDO SOBRE O USO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT) PARA MAPEAMENTO AÉREO COM FINS DE ELABORAÇÃO DE PROJETOS VIÁRIOS**; 1-Graduação; ENGENHARIA CIVIL; UNICAP; PE > *MDT / MDS*
4. ALMEIDA, Pedro; 2018; **AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE MOSAICO DE IMAGENS APLICADOS EM IMAGENS AGRÍCOLAS OBTIDAS POR MEIO DE RPAS**; 2-Mestrado; CIÊNCIAS DA COMPUTAÇÃO; UEPG; PR > *QUALIDADE*
5. ALVES JR., Leomar; 2015; **ANÁLISE DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS OBTIDOS COM CÂMERA DIGITAL NÃO MÉTRICA ACOPLADA A UM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO EM ÁREAS URBANAS E RURAIS NO ESTADO DE GOIÁS**; 2-Mestrado; GEOGRAFIA; UFG; GO > *CADASTRO*
6. BARBOSA, Bruno; 2017; **GERAÇÃO DE BASE CARTOGRÁFICA PARA ÁREA DE INTERESSE HISTÓRICO/CULTURAL POR MEIO DE LEVANTAMENTO FOTOGRAMÉTRICO ADQUIRIDO COM VANT (RPAS)**; 1-Graduação; CARTOGRAFIA; UFRGS; RS > *CADASTRO*
7. BARCELOS, Anna; 2017; **O USO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT) EM MONITORAMENTOS DE CAMPO: APLICABILIDADES E VIABILIDADES**; 1-Graduação; GEOGRAFIA; UFU; MG > *VEGETAÇÃO*
8. BRASIL, Guilherme; 2012; **MONITORAMENTO AMBIENTAL COM A UTILIZAÇÃO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANTS)**; 2-Mestrado; CIÊNCIAS AMBIENTAIS; UFPR; PR > *INSPEÇÃO*
9. CALOU, Vinícius; 2018; **USO DE VANTs NO MONITORAMENTO DA SIGATOKA-AMARELA DA BANENEIRA**; 2-Mestrado; ENGENHARIA AGRÍCOLA; UFC; CE > *VEGETAÇÃO*
10. CÂNDIDO, Anny; 2012; **TRATAMENTO DE IMAGENS ORBITAIS E SUBORBITAIS PARA CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DA CABECEIRA DO RIO SÃO LOURENÇO-MT**; 2-Mestrado; ENGENHARIA FLORESTAL; UFMT; MT > *VEGETAÇÃO*
11. CARNEIRO, Marciano; 2016; **GERAÇÃO DE MODELO DIGITAL DE TERRENO POR RESTITUIÇÃO AEROFOTOGRAMÉTRICA COM APOIO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO DE PEQUENO PORTE: ESTUDO DE CASO NA PEDREIRA DA EMPRESA INCOPEL - ESTÂNCIA VELHA / RS**; 2-Mestrado; CIÊNCIAS AMBIENTAIS; UNILASALLE; RS > *MDT / MDS*
12. CARVALHO, Naiallen; 2014; **REFERENCIAMENTO DE IMAGENS AÉREAS UTILIZANDO DADOS DE NAVEGAÇÃO PARA CONSTRUÇÃO AUTOMÁTICA DE MOSAICO DE IMAGENS**; 2-Mestrado; ENGENHARIA ELETRÔNICA; ITA; SP > *GENERALIDADES*
13. COSTA, João Vitor; 2018; **ANÁLISE DA DINÂMICA DE ESPELHOS D'ÁGUA EM**

- LAGOS ARTIFICIAIS NO SUL DA AMAZÔNIA, MATO GROSSO, UTILIZANDO DRONES**; 1-Graduação; CIÊNCIAS AMBIENTAIS; UFG; GO > *MDT / MDS*
14. CUNHA, Alexandre; 2018; **AVALIAÇÃO DE EROÇÃO POR IMAGENS A CURTA DISTÂNCIA**; 2-Mestrado; ENGENHARIA CIVIL; UFBA; BA > *MDT / MDS*
 15. CUNHA, João Paulo; 2018; **MAPEAMENTO CADASTRAL DE SÍTIOS ARQUEOLÓGICOS COM USO DE DADOS REMOTAMENTE ADQUIRIDOS - UM EXEMPLO DO MAPEAMENTO DE PETRÓGLIFOS DO SÍTIO ARQUEOLÓGICO DO BISNAU**; 2-Mestrado; GEOCIÊNCIAS; UNB; DF > *MDT / MDS*
 16. DIAS, Gilda; 2014; **LEVANTAMENTO DE LIMITES DE IMÓVEL RURAL COM USO DE VANT, ELDORADO DO SUL — RS**; 1-Graduação; CARTOGRAFIA; UFRGS; RS > *CADASTRO*
 17. FAGUNDES, Manuella; 2016; **GERAÇÃO DE BASE CARTOGRÁFICA TRIDIMENSIONAL COM O USO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT)**; 1-Graduação; CARTOGRAFIA; UFRGS; RS > *CADASTRO*
 18. FARIA, Alexandre; 2015; **AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE USO E OCUPAÇÃO DO PARQUE PARAHYBA — JOÃO PESSOA/PB**; 2-Mestrado; CIÊNCIAS AMBIENTAIS; UFPB; PB > *INSPEÇÃO*
 19. FELIX, Felipe; 2018; **COMPORTAMENTO SAZONAL DE COBERTURAS VEGETAIS A PARTIR DE IMAGENS DE SENSORES EMBARCADOS EM VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADO**; 2-Mestrado; CIÊNCIAS AMBIENTAIS; UNIFAL; MG > *VEGETAÇÃO*
 20. FERREIRA, Alexandre; 2014; **AVALIAÇÃO DE CÂMARA DE PEQUENO FORMATO TRANSPORTADA POR VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO — VANT, PARA USO EM AEROLEVANTAMENTOS**; 2-Mestrado; GEOCIÊNCIAS; UNB; DF > *QUALIDADE*
 21. FRANCA, Elias; 2015; **DETECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE, POR MEIO DE IMAGENS AÉREAS DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL**; 2-Mestrado; GEOGRAFIA; UFMT; MT > *CADASTRO*
 22. GONÇALVES, Luana; 2018; **ESTIMATIVA DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS DE LAVOURA CAFEEIRA A PARTIR DE IMAGENS OBTIDAS POR AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA**; 2-Mestrado; ENGENHARIA AGRÍCOLA; UFLA; MG > *MDT / MDS*
 23. JIM, André; 2018; **IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DA FERRUGEM (AUSTROPUCCINIA PSIDII) DO EUCALIPTO POR IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO OBTIDAS DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANT) E EM LABORATÓRIO (ESPECTRORADIÔMETRO)**; 3-Doutorado; ENGENHARIA FLORESTAL; UNESP; SP > *VEGETAÇÃO*
 24. LENZI, Italo; 2018; **SISTEMA DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA (RPAS) APLICADA AO INVENTÁRIO FLORESTAL DE TECTONA GRANDIS LINN F**; 2-Mestrado; ENGENHARIA FLORESTAL; UFMT; MT > *VEGETAÇÃO*
 25. LINHARES, Mayklyns; 2016; **USO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO NA DETERMINAÇÃO DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO EM ÁREA DE PASTAGEM EM NOVA MUTUM-MT**; 2-Mestrado; GEOGRAFIA; UFG; GO > *VEGETAÇÃO*
 26. LONGHITANO, George; 2010; **VANTS PARA SENSORIAMENTO REMOTO: APLICABILIDADE NA AVALIAÇÃO E MONITORAMENTO DE IMPACTOS**

- AMBIENTAIS CAUSADOS POR ACIDENTES COM CARGAS PERIGOSAS; 2-Mestrado; ENGENHARIA DE TRANSPORTES; USP; SP > GENERALIDADES**
27. LOPES, Tito; 2018; **ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE SISTEMA MINI-VANT COMERCIAL NO DIAGNÓSTICO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS DE DESASTRES NO BRASIL; 2-Mestrado; CIÊNCIAS AMBIENTAIS; USP; SP > INSPEÇÃO**
 28. LUZ, Cristhyano; 2015; **AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO ABSOLUTA DE ORTOFOTO OBTIDA POR MEIO DE DADOS BRUTOS ORIUNDOS DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (SISVANT); 2-Mestrado; CARTOGRAFIA; UFPR; PR > QUALIDADE**
 29. MACHADO, Marcela; 2018; **SINCRONIZAÇÃO POR PÓS-PROCESSAMENTO DE UM SISTEMA DE VARREDURA A LASER EMBARCADO EM VANT; 2-Mestrado; CARTOGRAFIA; UNESP; SP > MDT / MDS**
 30. MARTELLO, Maurício; 2017; **ESTIMATIVA DA ALTURA E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇUCAR UTILIZANDO IMAGENS OBTIDAS POR AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA; 2-Mestrado; AGRONOMIA; USP; SP > VEGETAÇÃO**
 31. MELO JR., Carlos; 2016; **METODOLOGIA PARA GERAÇÃO DE MAPAS DE DANOS DE FACHADAS A PARTIR DE FOTOGRAFIAS OBTIDAS POR VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS; 3-Doutorado; ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL; UNB; DF > INSPEÇÃO**
 32. MELO, Roseneia; 2016; **DIRETRIZES PARA INSPEÇÃO DE SEGURANÇA EM CANTEIROS DE OBRA POR MEIO DE IMAGEAMENTO COM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT); 2-Mestrado; ENGENHARIA CIVIL; UFBA; BA > INSPEÇÃO**
 33. MIRANDA NETO, Milton; 2016; **SISTEMA AUTOMÁTICO DE PLANEJAMENTO DE VOOS E TRATAMENTO DE IMAGENS PARA VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS; 2-Mestrado; ENGENHARIA ELÉTRICA; UFU; MG > INSPEÇÃO**
 34. NASCIMENTO, Santiago; 2017; **ANÁLISE DE MODELOS DIGITAIS DE TERRENO POR MEIO DA MODELAGEM HIDRÁULICA NA DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE RISCO DE INUNDAÇÃO; 2-Mestrado; ENGENHARIA AMBIENTAL; UFBA; BA > MDT / MDS**
 35. NIEMANN, Rafaela; 2017; **COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE FILTRAGEM E GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE TERRENO A PARTIR DE IMAGENS OBTIDAS POR VEÍCULO AÉREO NÃO-TRIPULADO; 2-Mestrado; GEOGRAFIA; UNESP; SP > MDT / MDS**
 36. OLIVEIRA, Luana; 2017; **AVALIAÇÃO DO USO DE SENSOR TERMAL A BORDO DE VANT ATRAVÉS DE ANÁLISES RADIOMÉTRICAS, ESPECTRAIS, ESPACIAIS E POSICIONAIS; 2-Mestrado; SENSORIAMENTO REMOTO; INPE; SP > QUALIDADE**
 37. OLIVEIRA, Matheus; 2016; **DETECÇÃO DE PATOLOGIAS EM PLANTAÇÕES DE EUCALIPTOS COM APRENDIZADO DE MÁQUINA; 2-Mestrado; CIÊNCIAS DA COMPUTAÇÃO; USP; SP > VEGETAÇÃO**
 38. OLIVEIRA, Raquel; 2017; **GERAÇÃO DE MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE HIPERESPECTRAL, EM ÁREAS DE FLORESTA UTILIZANDO CÂMARA HIPERESPECTRAL DE QUADRO EMBARCADA EM VANT; 3-Doutorado; CARTOGRAFIA; UNESP; SP > MDT / MDS**

39. PARENTE, Denis; 2016; **UTILIZAÇÃO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT) NA IDENTIFICAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) DISPOSTOS EM LOCAIS INADEQUADOS**; 2-Mestrado; ENGENHARIA AMBIENTAL; UFPA; TO > *INSPEÇÃO*
40. PEGORARO, Antoninho; 2013; **ESTUDO DO POTENCIAL DE UM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO/ QUADROTOR, COMO PLATAFORMA NA OBTENÇÃO DE DADOS CADASTRAIS**; 3-Doutorado; ENGENHARIA CIVIL; UFSC; SC > *CADASTRO*
41. PEREIRA, Bruno; 2017; **ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS COM FOTOGRAFIAS OBTIDAS POR VANT (RPAS)**; 1-Graduação; GEOGRAFIA; UNESP; SP > *MDT / MDS*
42. PINTO, Felipe; 2018; **CLASSIFICAÇÃO DO ESTÁGIO SUCESSIONAL DA VEGETAÇÃO EM ÁREAS DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA (FOM) COM O EMPREGO DE IMAGENS DIGITAIS OBTIDAS POR VANT (VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO)**; 2-Mestrado; ENGENHARIA FLORESTAL; UESC; SC > *VEGETAÇÃO*
43. PORTES, Marcelo; 2018; **SENSORIAMENTO REMOTO TERMAL USANDO VEÍCULO AÉREO NÃO-TRIPULADO NA CAFEICULTURA DE MONTANHA**; 2-Mestrado; ENGENHARIA AGRÍCOLA; UFV; MG > *MDT / MDS*
44. RODRIGUES, Avilmar; 2016; **USO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS PARA MAPEAMENTO E AVALIAÇÃO DE EROÇÃO URBANA**; 2-Mestrado; GEOGRAFIA; UFG; GO > *MDT / MDS*
45. RODRIGUES, Éder; 2018; **ESTUDO SOBRE A FISIOLOGIA DA PAISAGEM DO AREAL DO CERRO DA ESQUINA NO MUNICÍPIO DE SÃO FRANCISCO DE ASSIS - RS**; 2-Mestrado; GEOGRAFIA; UFRGS; RS > *MDT / MDS*
46. ROSA, Joel; 2018; **DIAGNÓSTICO DE PROCESSOS EROSIVOS EM SOLOS AGRÍCOLAS MEDIANTE ANÁLISES DE MODELOS NUMÉRICOS DO TERRENO**; 2-Mestrado; CIÊNCIAS DA COMPUTAÇÃO; UEPG; PR > *MDT / MDS*
47. RUIZ, Luis; 2015; **UMA ABORDAGEM DE CLASSIFICAÇÃO DA COBERTURA DA TERRA EM IMAGENS OBTIDAS POR VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO**; 2-Mestrado; SENSORIAMENTO REMOTO; UFRGS; RS > *CADASTRO*
48. SANTOS, Evandro; 2018; **ANÁLISE DA PERFORMANCE DOS SENSORES ÓPTICOS E POR TRANSMITÂNCIA DE RAIOS-X NO PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO DE CALCÁRIO EM MINA DE CAÇAPAVA DO SUL/RS**; 2-Mestrado; GEOLOGIA; UNIPAMPA; RS > *MDT / MDS*
49. SANTOS, Ivaneide; 2017; **NOVAS METODOLOGIAS PARA REPRESENTAÇÃO GEOESPACIAL E VALORIZAÇÃO DOS ELEMENTOS DA GEODIVERSIDADE: INTEGRAÇÃO DE GEOTECNOLOGIAS, RECURSOS ONLINE E REALIDADE AUMENTADA**; 3-Doutorado; GEOCIÊNCIAS; UFPE; PE > *GENERALIDADES*
50. SANTOS, Luiz; 2016; **AVALIAÇÃO DE MODELO DIGITAL DE TERRENO GERADO ATRÁVES DE VANT EM PLANÍCIES PANTANEIRAS**; 1-Graduação; ENGENHARIA FLORESTAL; UFMT; MT > *MDT / MDS*
51. SARTORI, Rueliton; 2018; **AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE MODELOS HIDRODINÂMICOS PARA PREVISÃO DE INUNDAÇÕES: UM ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE GETÚLIO VARGAS-RS**; 2-Mestrado; CIÊNCIAS AMBIENTAIS;

- UFFS; RS > *MDT/MDS*
52. SILVA, Álvaro; 2018; **DELIMITAÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA RECUPERAÇÃO DE VEGETAÇÃO NATIVA E CONTROLE DE DISPERSÃO DA CASUARINA EUISETIFOLIA L NO PARQUE ESTADUAL DA COSTA DO SOL, A PARTIR DE IMAGENS AÉREAS OBTIDAS COM VANT**; 2-Mestrado; ENGENHARIA AMBIENTAL; IFF; RJ > *INSPEÇÃO*
 53. SILVA, Cristiano; 2015; **AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DOS ORTOMOSAICOS E MODELOS DIGITAIS DO TERRENO GERADOS POR VANT E SUA APLICAÇÃO NO CÁLCULO DE VOLUME DE PILHAS DE REJEITO DA PEDRA CARIRI**; 2-Mestrado; GEOLOGIA; UFC; CE > *MDT/MDS*
 54. SILVA, Daniel; 2018; **VIABILIDADE E ACURÁCIA DE VANT PARA O MONITORAMENTO COSTEIRO TRIDIMENSIONAL**; 2-Mestrado; GEOCIÊNCIAS; UFPE; PE > *MDT/MDS*
 55. SILVA, Elizabeth; 2018; **SENSORIAMENTO REMOTO POR MEIO DE UMA AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA PARA ESTUDOS DO MANGUEZAL DA BAÍA DE VITÓRIA (ES)**; 3-Doutorado; OCEANOGRAFIA; UFES; ES > *VEGETAÇÃO*
 56. SILVA, Gabriela; 2016; **AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DO LEVANTAMENTO DA ÁREA CONSTRUÍDA DA UTFPR-DV POR IMAGENS DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT) UTILIZANDO CÂMERA NÃO-MÉTRICA**; 1-Graduação; ENGENHARIA FLORESTAL; UTFPR; PR > *MDT/MDS*
 57. SILVA, Orildo; 2016; **EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS DE CARSTIFICAÇÃO DA FORMAÇÃO JANDAÍRA, BACIA POTIGUAR, UTILIZANDO DADOS OBTIDOS POR LIDAR E VANT**; 2-Mestrado; GEOLOGIA; UFRN; RN > *INSPEÇÃO*
 58. SILVA, Thamyres; 2018; **MONITORAMENTO DE ÁREAS EM RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA POR MEIO DE LEVANTAMENTO FOTOGRAFÉTRICO EXECUTADO POR VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO: Estudo de caso para regiões na Mata Atlântica, em Miguel Pereira — RJ**; 1-Graduação; CARTOGRAFIA; UFRA; AM > *VEGETAÇÃO*
 59. SOUZA, Gabriel; 2015; **ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE VANT PARA MAEAMENTOS TOPOGRÁFICO E DE COBERTURA E USO DA TERRA**; 1-Graduação; CARTOGRAFIA; UFRGS; RS > *MDT/MDS*
 60. SOUZA, Gabriel; 2018; **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CONFIGURAÇÕES DOS PONTOS DE APOIO E DO VOO NA ACURÁCIA DE ORTOFOTOMOSAICOS ELABORADOS A PARTIR DE DADOS DE VANT**; 2-Mestrado; SENSORIAMENTO REMOTO; UFRGS; RS > *QUALIDADE*
 61. TORRES, Fernanda; 2016; **MONTAGEM E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE VARREDURA A LASER EMBARCADO EM VANT**; 2-Mestrado; CARTOGRAFIA; UNESP; SP > *MDT/MDS*
 62. VALE, Daniel; 2018; **PESQUISA MINERAL E REAVALIAÇÃO DA RESERVA DE GRANITO ORNAMENTAL NO CÓRREGO ÁGUA PRETA, MUNICÍPIO NOVA VENÉCIA, ESTADO DO ESPÍRITO SANTO**; 2-Mestrado; GEOLOGIA; UNIPAMPA; RS > *MDT/MDS*
 63. VINISKI, Antônio; 2018; **AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO USO DA MINERAÇÃO**

DE DADOS CLÁSSICA E ESPACIAL NA ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DE GRÃOS EM IMAGENS OBTIDAS POR MEIO DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADA; 2-Mestrado; CIÊNCIAS DA COMPUTAÇÃO; UEPG; PR > *VEGETAÇÃO*

64. ZANETTI, Juliette; 2017; **INFLUÊNCIA DO NÚMERO E DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS DE CONTROLE EM ORTOFOTOS GERADAS A PARTIR DE UM LEVANTAMENTO POR VANT; 2-Mestrado; ENGENHARIA CIVIL; UFV; MG > *QUALIDADE***

3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE POSICIONAL EM LEVANTAMENTOS AEROFOTOGRAMÉTRICOS VIA ARP, NAS COBERTURAS COM GEOMETRIA DE CORREDOR E USO DE GD-PPK

3.1 Introdução

A qualidade posicional dos produtos geoespaciais é fator essencial para que estes possam refletir os objetos do mundo real aos quais se referem. Tal qualidade é avaliada pela acurácia posicional absoluta, em que discrepâncias planialtimétricas de elementos, ao longo dos produtos, são medidas com relação às feições homólogas obtidas em produtos com reconhecida qualidade posicional superior (sejam coletas diretas em campo ou extraídos de outros produtos geoespaciais).

Para que a avaliação posicional possa ser considerada acurada, é necessário que o conjunto de dados avaliados não apresente medidas enviesadas, quer seja por erros grosseiros ou por erros sistemáticos. E que, preferencialmente, a medida de associação das discrepâncias reflita a mescla do valor de tendência central (usualmente a média) com o de dispersão em torno deste (usualmente o desvio padrão), sendo a raiz quadrada do erro médio (RMSE) frequentemente utilizada em padrões internacionais de qualidade cartográfica.

A geometria dos voos aerofotogramétricos, aqui entendida como a integração da forma das linhas de voo associadas aos percentuais de recobrimento longitudinal e lateral das fotos, influencia diretamente a qualidade e a produtividade dos levantamentos. A geometria de coleta aerofotogramétrica por voo em corredor é indicada para coberturas de elementos lineares de infraestrutura, como em rodovias, pois otimiza a quantidade de fotos coletadas por área de cobertura, agilizando tanto a coleta quanto o processamento de geração dos produtos dele decorrentes (Ortomosaicos e Modelos de Elevação).

O georreferenciamento direto (GD) é uma técnica fotogramétrica que possibilita a obtenção das posições das fotos (coordenadas e ângulos de atitude) sem a necessidade de pontos de controle, utilizando-se a integração de dados obtidos diretamente dos sensores de voo (GNSS e INS). Para que o GD tenha melhor qualidade posicional, é necessário corrigir a trajetória GNSS da aeronave por posicionamento relativo cinemático, seja em tempo real (RTK) ou pós-processado (PPK) (ZHANG *et al.*, 2019).

A avaliação das quantidades de fotos necessárias para coberturas aerofotogramétricas de elementos lineares de infraestrutura, feita pelo autor ao longo do planejamento da coleta de dados, demonstra que a quantidade mínima para realizar a cobertura

é obtida com a coleta por linha única de voo, central ao elemento imageado. Essa geometria de coleta associada à ausência de pontos de controle em solo, com a utilização do georreferenciamento direto das fotos, seja por PPK ou RTK, pode ser considerada o esquema de maior eficácia, pois apresenta tanto a menor quantidade de fotos quanto a menor necessidade de marcações em solo. Essa implementação otimizada, todavia, pode acrescentar erros aos produtos decorrentes, causados por falta de rigidez geométrica na coleta, impedindo seu uso em projetos que exijam bons níveis de qualidade posicional (WIACEK, 2020; TOURNADRE *et al.*, 2015).

A legislação do DNIT aponta que os produtos decorrentes de processos aerofotogramétricos para utilização em projetos executivos de engenharia rodoviária devem ser planimetricamente condizentes à escala 1/2000 na Classe A do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC, BRASIL, 1984) e altimetricamente compatíveis com curvas de nível de metro em metro na Classe A do PEC. Os impactos da combinação de GD-PPK com cobertura em corredor ainda carecem de avaliações, tendo sido encontradas poucas publicações científicas que tratem do assunto. Este capítulo investiga se o processo fotogramétrico através de ARP, em coletas com geometria de corredor e utilização do GD-PPK é compatível, sob a ótica de exatidão, à de se utilizar pontos de controle ao longo da área de cobertura, contrapondo a qualidade da aerotriangulação das duas soluções em situações, nas quais são implementados voos com geometria de coleta com três linhas ou com linha simples central ao trecho imageado, indicando quais associações apresentam as melhores características para gerar produtos decorrentes, como modelos do terreno e nuvens de pontos, com possibilidade de serem utilizados em projetos de engenharia rodoviária.

O conjunto de dados foi obtido em um trecho em obras da BR-070 com cerca de 6,4km de extensão. A cobertura aerofotogramétrica foi realizada através de dois voos, que recobriram o trecho entre as estacas E5+00 e E317+00 (6.240,0 m), sendo que o primeiro voo (V1) cobriu cerca de 3,55km, da estaca E5+00 até 182+10, e o segundo (V2), o restante do trecho.

Para avaliar os cenários aerofotogramétricos, foram usadas duas variáveis: a COBERTURA, dividida em seis níveis (que representam as associações dos voos aos tipos de geometria de coleta) e o TRATAMENTO, com quatro níveis (que representam os tipos de controle fotogramétrico para determinação das posições das fotos) — totalizando 24 grupos de análise dos produtos aerofotogramétricos.

São avaliadas 100 amostras por grupo, obtidas pelo Método de Monte Carlo (MMC), que simula coletas com características semelhantes efetuadas em campo, pela variação

posicional aleatória dos elementos de entrada no processo fotogramétricos (coordenadas das fotos e pontos de controle/chechagem), na medida da dispersão de suas precisões obtidas pelos métodos adotados nos seus devidos métodos de posicionamento GNSS (fotos navegadas sem controle ou corrigidas pelo GD-PPK e pontos de campo obtidos com correções RTK de bases locais). A qualidade avaliada é obtida pelas divergências posicionais, geradas na etapa de aerotriangulação de cada amostra dos grupos, em que as coordenadas dos pontos de checagem são avaliadas com relação àquelas obtidas da coleta em campo e totalizadas na forma da raiz quadrada do erro médio (RMSE).

A primeira avaliação das amostras dos grupos de análise foi com relação à capacidade de o processo gerar dados que apresentem tendências planimétricas ou altimétricas. Para tanto, implementou-se uma regressão logística binária da variável TENDÊNCIA (ausência/presença) com relação aos níveis de TRATAMENTO e COBERTURA, resultado na indicação de quais grupos de análise apresentam maiores probabilidades de gerar dados tendenciosos.

Por fim, utilizou-se somente as amostras livres de tendências, dos grupos de análise, para a avaliação em relação às exigências planimétricas e altimétricas do Padrão de Acurácia Posicional para Produtos Cartográficos Digitais (PAP-PCD), verificando quais grupos de análise atendem às especificações determinadas pelo DNIT para geração de produtos apropriados ao uso em projetos executivos de engenharia rodoviária. A planimetria foi verificada para as escalas 1/2000 (tanto na classe B, quanto na classe A do PAP-PCD); 1/1000 (classe A do PAP-PCD) e 1/500 (classe A do PAP-PCD). Na análise altimétrica as amostras foram avaliadas pela capacidade de gerar produtos compatíveis com as curvas de nível de metro em metro (tanto classe A quanto classe B do PAP-PCD) ou curvas de nível de meio em meio metro (classe A do PAP-PCD).

3.2 Revisão bibliográfica

A Sociedade Americana para Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ASPRS) define o termo “Fotogrametria” como a “arte, ciência e tecnologia para obter informações confiáveis sobre objetos físicos e meio ambiente, através do processo de gravação, medição e interpretação de imagens e representações digitais de padrões de energia derivados de sistemas sensores remotos” (ASPRS, 1989). Tommaselli (2009, p. 2) indica que “fotogrametria aérea (ou aerofotogrametria) é uma subdivisão da fotogrametria, na qual as fotografias do terreno são tomadas por uma câmara de precisão montada em uma aeronave.”

O levantamento aerofotogramétrico com uso de aeronaves remotamente pilotadas (ARP) é uma atividade técnica de coleta de dados em que câmeras fotográficas digitais não métricas de pequeno formato são embarcadas em aeronaves dotadas de Sensores Inerciais de Navegação (INS) e de receptores GNSS. Isso permite ao equipamento realizar coleta autônoma de fotos, em uma área pré-planejada por uma missão, com a devida sobreposição entre as fotos que permita a extração de dados pelo processo fotogramétrico.

A sigla RPA (*Remotely Piloted Aircraft*) é usada na regulamentação nacional do uso não recreativo das aeronaves comumente chamadas de “drones”, enquanto RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*) agrega ao RPA todos “os enlaces de comando e controle requeridos e quaisquer outros elementos que podem ser necessários a qualquer momento durante a operação” (COMANDO DA AERONÁUTICA, 2017). No Brasil, apesar de o termo RPA estar presente na legislação, o usual é usar a sigla ARP, de Aeronave Remotamente Pilotada.

A Figura 3.1 apresenta alguns exemplos de modelos de ARP disponíveis no mercado nacional.

Figura 3.1- Exemplos de modelos de ARP, aeronaves remotamente pilotadas



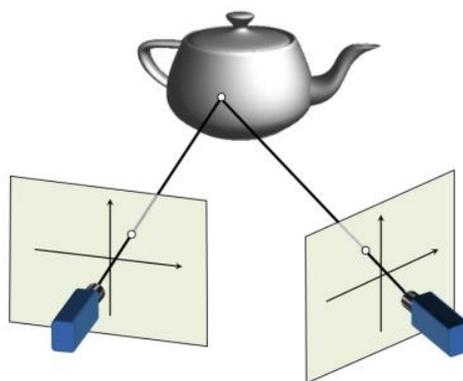
Fonte: Adaptada de <<https://aeroengenharia.com/>> . Acesso em 24/06/2022.

Fotogrametria via ARP, nestes termos, se dedica à “reconstrução digital dos objetos pertencentes à cena fotografada a partir do cálculo da posição tridimensional de pontos homólogos, presentes em duas ou mais imagens, pela triangulação de raios projetivos formados

entre a câmera e os pontos investigados” (adaptado de MOONS *et al.*, 2008). Com essa configuração, a coleta de dados é classificada como “passiva, de múltiplas perspectivas”,⁴ em que os sistemas utilizam fonte externa de iluminação (luz do Sol) para obter imagens do terreno em diferentes pontos de vista.

A Figura 3.2 apresenta esquematicamente como é feita a triangulação para a obtenção dos pontos.

Figura 3.2- Triangulação de raios projetivos na determinação de um ponto pertencente à feição.



Fonte: MOONS *et al.*(2008)

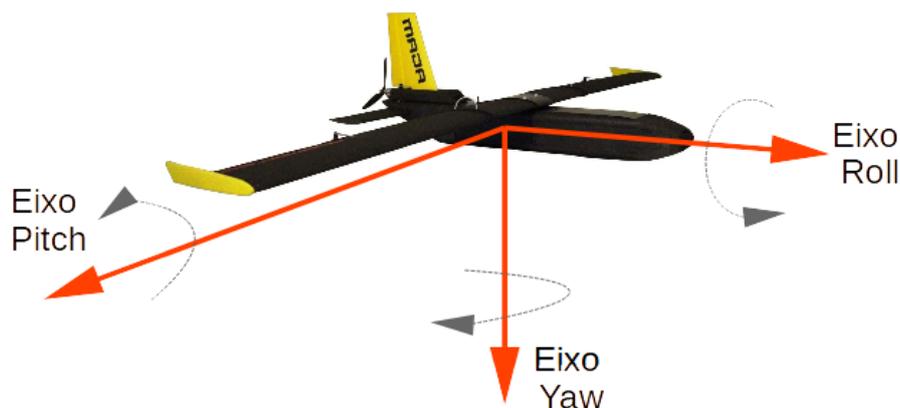
A iteração da triangulação dos inúmeros pontos homólogos nas várias imagens acaba por gerar uma nuvem de pontos que representam tridimensionalmente o objeto imageado. O manual do software fotogramétrico METASHAPE nomeia o processo de triangulação como “alinhamento das fotos”, etapa na qual o programa “encontra automaticamente pontos de amarração e estima os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera” (AGISOFT, 2021, p. 39).

Os parâmetros extrínsecos são conhecidos como os de orientação exterior (POE), compreendidos pela associação das coordenadas tridimensionais X, Y, Z (UTM-E, UTM-N e Altitude ortométrica), do centro projetivo (CP), da lente com os ângulos de atitude da câmera (*roll*, ω ; *pitch*, φ e *yaw*, κ), obtidos no momento da tomada de cada foto.

A Figura 3.3 proporciona uma visão dos eixos e sentidos de rotação considerados.

⁴ MOONS *et al.* (2008, p. 292), em tradução livre feita pelo autor de “passive, multi-vantage points”.

Figura 3.3: Rotação nos eixos de coleta



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Já os parâmetros intrínsecos são os de orientação interior (POI), compostos pela distância focal (f); pelas coordenadas de ponto principal (x_0, y_0); pelos coeficientes de afinidade e não ortogonalidade (B_1, B_2); pelos coeficientes de distorção radial (K_1, K_2, K_3, K_4) e pelos coeficientes de distorção tangencial (P_1, P_2) da lente.

O manual (AGISOFT, 2021) explica, ainda, que os POI podem ser obtidos através da pré-calibração da câmera ou podem ser estimados durante o alinhamento, sendo modificados cada vez em que há a otimização do alinhamento — procedimento que recalcula os POI e os POE, ajustando todo conjunto de dados para o menor erro possível diante dos parâmetros de processamento.

Javadnejad *et al.* (2021) descrevem, em minúcias, o processo fotogramétrico para a obtenção da estrutura tridimensional das superfícies imageadas, a partir de câmeras digitais não métricas, como as utilizadas nos levantamentos via ARP. Em resumo, são utilizadas duas técnicas computacionais no processo, a *Structure from Motion* (SfM) e a *Multiview Stereopsis* (MVS), que, dada a interrelação constante entre elas, são comumente denominadas de processo SfM-MVS na literatura acadêmica.

Os autores explicam que o SfM é utilizado na etapa de orientação das fotos, gerando a nuvem esparsa de pontos de amarração, enquanto o MVS é responsável por aumentar a quantidade de pontos da nuvem de amarração, obtendo a nuvem densa de pontos: produto geoespacial, que é base para a obtenção dos modelos de elevação do processo fotogramétrico. Ariza e Gordo (2008, p. 45) explicam que a falta de acurácia posicional em produtos geoespaciais, significa a “existência de uma distorção posicional interprodutos, que é uma barreira à interoperação. Essa barreira não é apenas para os aspectos posicionais e geométricos, mas também, para os temáticos que são muito afetados pela posição.”

A qualidade posicional é dada em função da acurácia posicional dos elementos do

produto, sejam pontos, linhas, áreas, células etc., em um sistema apropriado de projeção, sendo necessário, para que se possa afirmar que os produtos são posicionalmente acurados, avaliar se estes não apresentam erros sistemáticos (tendências) ou grosseiros nas suas medidas, sejam planimétricas ou altimétricas (ARIZA-LÓPEZ; RODRÍGUEZ-AVI, 2015).

Todo processo de produção implica aceitar a presença de erro, alguns negligenciáveis (ditos próprios do processo ou randômicos), outros considerados desprezíveis (dada a finalidade do produto) e outros, ainda, que podem ser tratados (modelados ou eliminados), melhorando assim a qualidade do processo ou do produto. Na produção de dados geoespaciais, os erros sistemáticos e os erros grosseiros estão nessa última classificação.

Erros grosseiros são aqueles que apresentam valores maiores do que um certo limite estabelecido, devendo ser descartados da análise. Erros sistemáticos, por sua vez, são caracterizados pela presença de tendências nas componentes altimétricas ou planimétricas, indicando se tratar de dados enviesados que impedem que a discrepância observada possa ser considerada nula (hipótese indispensável para que o dado obtido represente os objetos do mundo real de forma fidedigna).

Valor acurado, nesse contexto, é entendido como aquele que tem grande proximidade com a medida real, estando livre tanto de erros grosseiros como de erros sistemáticos (GRANSHAW, 2020). A partir da avaliação de tendência, pode-se implementar procedimentos para mitigar ou eliminar o problema, como o da translação altimétrica do produto tendencioso, pela média das discrepâncias medidas nos pontos de checagem (SANTOS *et al.*, 2016; CARVALHO e SILVA, 2018).

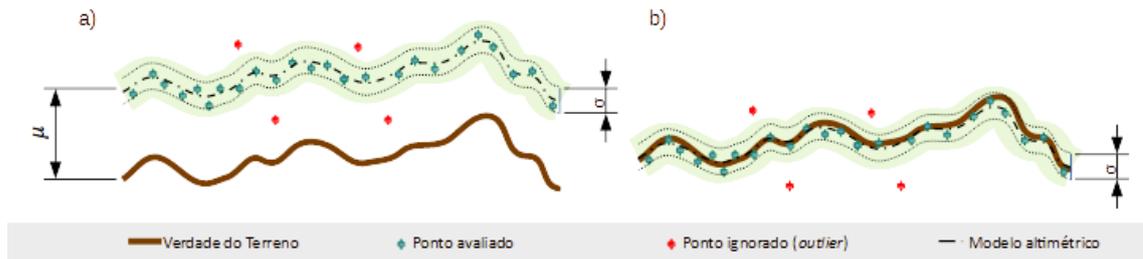
Polidori e Hage (2020) indicam que a realização altimétrica de um ponto pode ser representada pela Equação 1:

$$\hat{z} = z_i + \mu + \varepsilon'_i + \varepsilon''_i \quad (1)$$

Onde \hat{z} representa a altitude obtida no processo; z_i é a altitude verdadeira; μ é o erro sistemático, ε'_i representa o erro randômico espacialmente correlacionado e ε''_i é o erro randômico espacialmente não correlacionado (ruído).

A translação altimétrica é realizada fazendo com que o valor da média dos valores seja igual a 0. A Figura 3.4 representa os elementos em um modelo altimétrico, onde μ é a média das discrepâncias (que pode ser um viés, dependendo da sua dimensão) e σ os erros randômicos.

Figura 3.4- Esquema da translação altimétrica.



Representações: a) Dado original; b) Translação pela média das discrepâncias ($\mu = 0$).

Fonte: adaptado de Polidori e Hage (2020).

O RMSE é a medida utilizada no artigo e em vários padrões de qualidade cartográfica mundo afora, como o *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA), do governo federal norte-americano (FGDC, 1998) e o *Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data* (ASPRS, 2014).

No Brasil, o RMSE é a medida indicada como referência para avaliação dos produtos cartográficos no Padrão de Acurácia Posicional para Produtos Cartográficos Digitais (PAP-PCD), publicado na Norma para Especificação Técnica para Produtos de Conjunto de Dados Geoespaciais (ET-PCDG) do Exército Brasileiro (EB, 2016). A utilização de dados que não apresentem tendência planialtimétrica é uma das premissas para que se possa proceder à avaliação de qualidade de produtos nas classes do PAP-PCD.

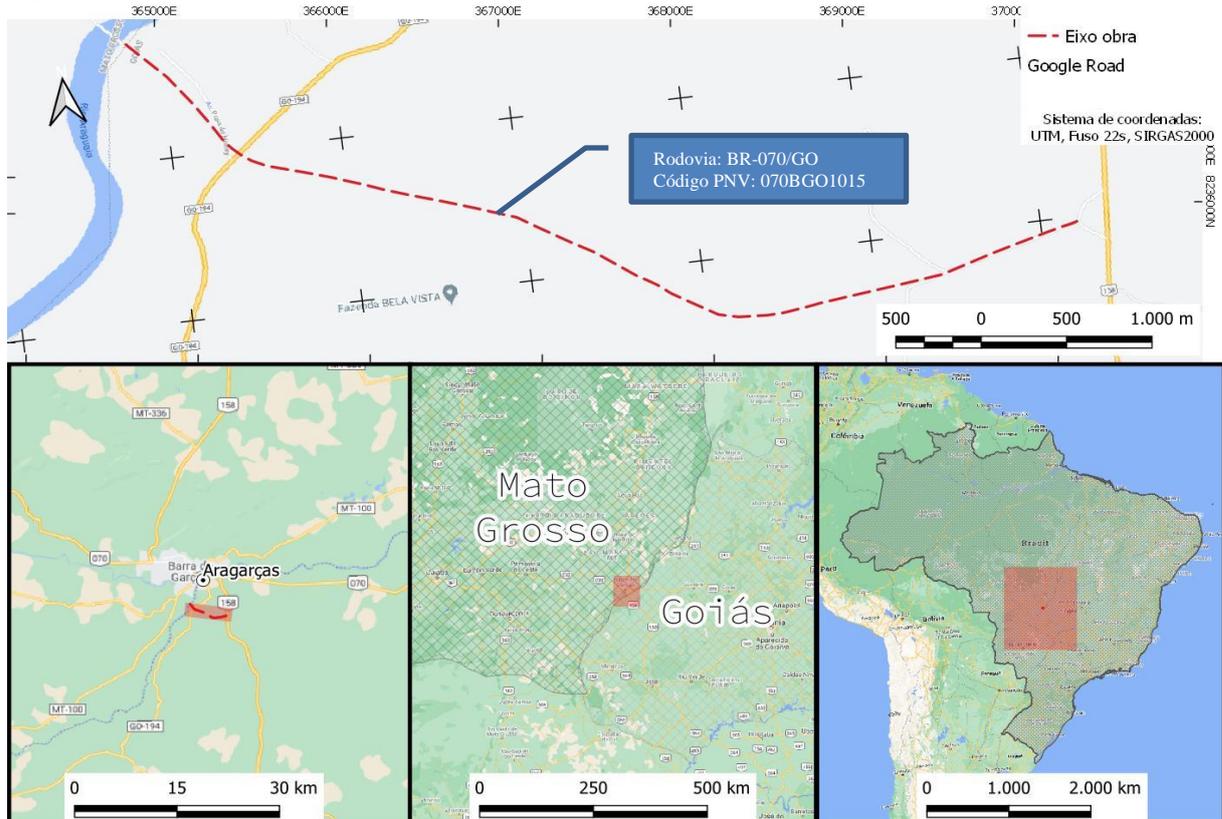
3.3 Materiais e métodos

A coleta, neste estudo, recobriu parte do contorno rodoviário do município de Aragarças (GO), num trecho da BR-070 que estava em obras de implantação e pavimentação. O Projeto Geométrico da obra (DNIT, 2018) aponta o início da obra na estaca E-0+00 (interseção em desnível com a BR-158) e o final na estaca E-317+9,60 (ponte sobre o Rio Araguaia — Divisa GO/MT), com extensão total de 6.349,60 metros. A Figura 3.5 apresenta a área de estudos e o segmento rodoviário analisado.

3.3.1 Cobertura aerofotogramétrica

Foram realizados dois voos para cobertura o segmento rodoviário, entre as estacas E5+00 e E317+00 (6.240,0 m) — excluindo, assim, as obras do viaduto e da ponte.

Figura 3.5- Área de estudos e localização do segmento rodoviário analisado.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

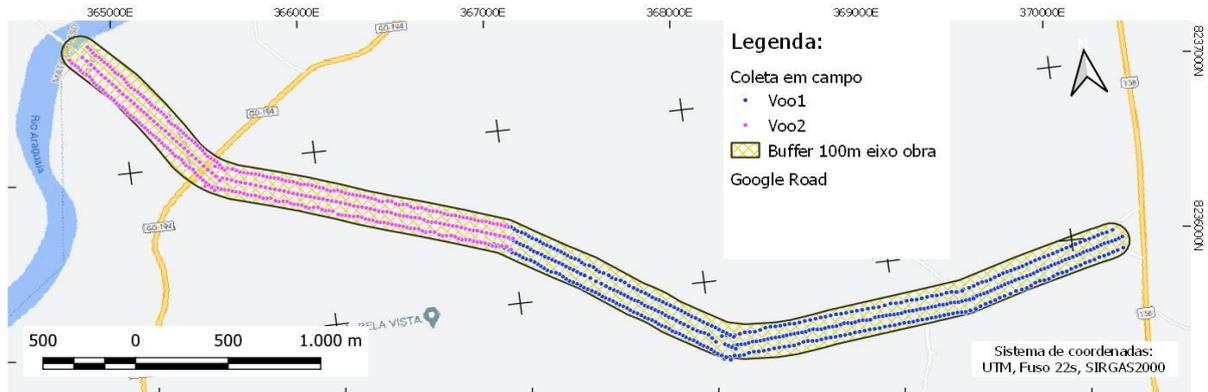
A coleta ocorreu em 26 de setembro de 2020, um dia sem nuvens. O horário do pôr-do-sol na localidade garantiu a V1 uma condição “ideal” de iluminação e a V2 uma condição “suficiente”. O primeiro voo (V1) capturou 472 fotos e o segundo (V2), outras 367 fotos — totalizando 839 fotos na cobertura (V1V2). A coleta consumiu cerca de duas horas em campo, com início por volta das 15h50, horário local. A duração de V1 foi de cerca de 20 minutos no ar e V2, outros 10 minutos.

Foi utilizada a ARP senseFly EBEE PLUS do tipo asa fixa. A aeronave conta com sensor GNSS de simples frequência e IMU de navegação, responsáveis, respectivamente, pela captura das coordenadas e atitudes da aeronave, que possibilitam a obtenção da trajetória corrigida da aeronave por processamento cinemático pós-processado (PPK) ou em tempo real (RTK). A câmera fotográfica digital utilizada foi a senseFly S.O.D.A, com distância focal fixa de 10,6mm e sensor de 20 megapixels, de 1 polegada de diâmetro — o conjunto é interligado aos sensores GNSS/IMU, permitindo a realização do Georreferenciamento Direto (GD) da posição das fotos.

As geometrias dos planos de voo das coletas V1 e V2 foram em formato de corredor de três linhas, com recobrimentos longitudinal e lateral de 80% e 60%, respectivamente. A altura de voo de foi de 120m, obtendo um *Ground Sample Distance* (GSD) de 2,8cm. A área

de recobrimento foi equivalente a um *buffer* de 100 metros de raio em torno do eixo do trecho. A Figura 3.6 apresenta a área coberta pela coleta.

Figura 3.6- Área de cobertura dos voos



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

O Quadro 3.1 apresenta o resumo da coleta aerofotogramétrica.

Quadro 3.1- Resumo da coleta aerofotogramétrica

Dados Gerais		Fotos coletadas		Geometria da coleta	
Aeronave	SenseFly EBEE PLUS	Voo V1	472	Cobertura corredor	3 faixas
Câmera	SenseFly S.O.D.A	Voo V2	367	Recobrimento lateral	60%
Atura voo	120 m	Total	839	Recobrimento longitudinal	80%
GSD	2,8 cm	Tempo de coleta		Trecho coletado	
Qdt. Voos	2	Total	120 min	Código PNV	070BGO1015
Coleta realizada no dia 26/09/2020, com início às 15:50		Tempo V1	20 min	Extensão coleta	6.240 m
		Tempo V2	10 min	Área coleta	64,4 hectares

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.3.1.1 Controle e checagem do processo aerofotogramétrico

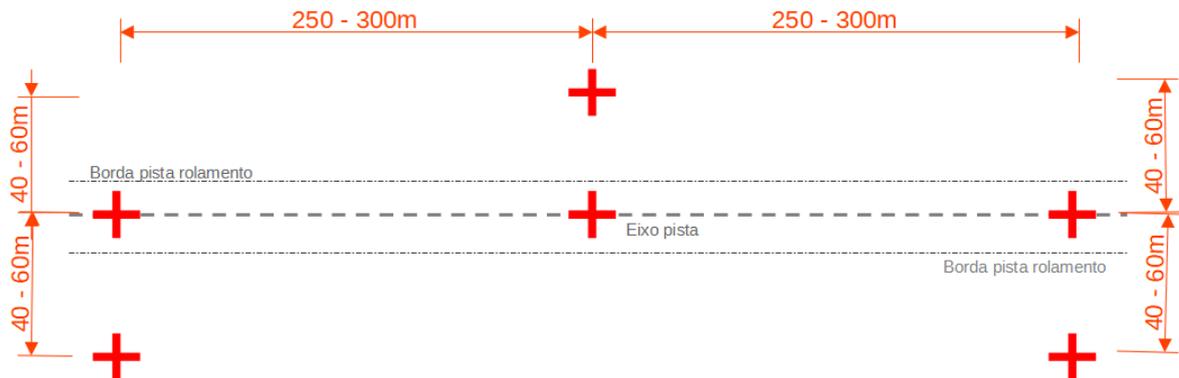
O planejamento da distribuição das marcações de solo, utilizadas como pontos de controle ou checagem no processo fotogramétrico, foi delineado para cobertura total do segmento rodoviário estudado, obedecendo à seguinte estratégia: a cada 250m - 300m do eixo da rodovia, foi realizada uma marcação na plataforma da pista de rolamento — o conjunto dessas marcações serviu para o controle da linha central do levantamento aerofotogramétrico. A estratégia de distribuição seguiu as conclusões do trabalho de Ferrer-González *et al.* (2020), que analisaram o impacto da forma de distribuição dos pontos de controle em levantamentos de corredor. Naquela pesquisa, assim como nessa, procurou-se manter a densidade mínima de 10 pontos de controle por quilômetro quadrado.

Para o controle das linhas à “esquerda” e à “direita”, a estratégia foi usar pontos alternados — ora para a esquerda, ora para a direita — com a distância de *offset* do eixo variando entre 40m e 60m. A Figura 3.7 demonstra a vista superior do esquema geral que norteou a

implementação das marcações.

A rede planialtimétrica de apoio à obra rodoviária em questão, implantada ao longo do segmento e materializada por marcos de concreto, foi usada como pontos de base para os levantamentos realizados nesta pesquisa. A determinação das coordenadas das marcações foi realizada através de receptores GNSS de dupla frequência, com estratégia de posicionamento cinemático em tempo real (GNSS-RTK).

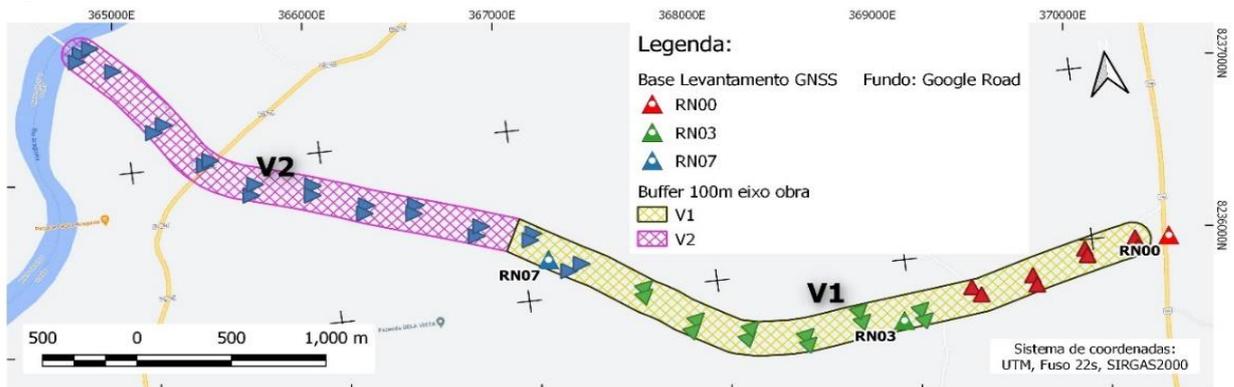
Figura 3.7- Vista superior do esquema de distribuição das marcações em solo



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A Figura 3.8 traz a distribuição das marcações em solo ao longo do segmento e a posição dos marcos RN00, RN03 e RN07, utilizados como referência para o posicionamento GNSS-RTK.

Figura 3.8- Distribuição das marcações e local das bases RTK utilizadas em campo.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Das 46 marcações implantadas, cinco não foram utilizadas — uma perdida pela movimentação de solo da obra e o restante pela falta de cobertura no momento do voo (foram implantadas na área da obra do viaduto).

3.3.2 Variáveis de análise fotogramétrica e seus níveis

A avaliação dos arranjos geométricos, do levantamento aerofotogramétrico é realizada na variável COBERTURA, com seis níveis:

a) O nível “V1” indica o processamento dos dados do primeiro voo com três linhas de coleta;

b) O nível “V1C” indica o processamento dos dados do primeiro voo considerando somente a linha central de coleta;

c) O nível “V2” indica o processamento dos dados do segundo voo com três linhas de coleta;

d) O nível “V2C” indica o processamento dos dados do segundo voo considerando somente a linha central de coleta;

e) O nível “V1V2” indica o processamento dos dados do primeiro voo associados ao do segundo voo, com três linhas de coleta;

f) O nível “V1V2C” indica o processamento dos dados do primeiro voo associados ao do segundo voo, considerando somente a linha central de coleta;

Os níveis de COBERTURA V1C, V2C e V1V2C representam a geometria de coleta com linha única, que otimiza ao extremo o processo pela diminuição da quantidade de fotos coletadas por área de cobertura. Essa otimização gera uma estrutura geométrica de coleta menos robusta, que pode implicar perda significativa de qualidade nos produtos decorrentes (WIACEK, 2020; TOURNADRE *et al.*, 2015).

A utilização das fotos com posições obtidas por GD-PPK foi avaliada em quatro níveis, na variável TRATAMENTO:

a) O nível “CT” representa a ausência de correção GD-PPK. É a solução que utiliza pontos de controle ao longo da cobertura em combinação com as coordenadas de navegação das fotos (NAV) na aerotriangulação;

b) O nível “BC0” representa a utilização das fotos GD-PPK sem associação de pontos de controle na aerotriangulação;

c) O nível “BS1” representa a utilização das fotos GD-PPK em associação a um ponto de controle na aerotriangulação; e

d) O nível “BS3” representa a utilização das fotos GD-PPK em associação a três pontos de controle na aerotriangulação.

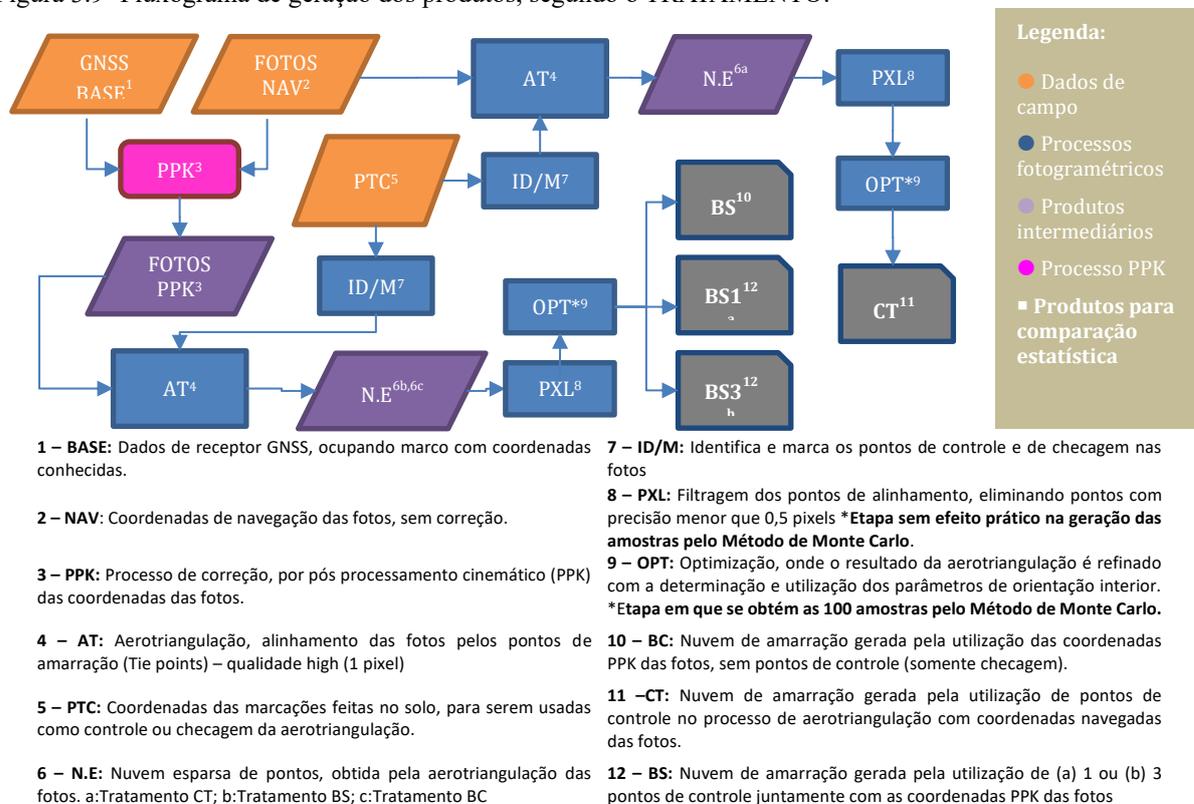
A Figura 3.9 demonstra o fluxograma de produção dos elementos nos níveis da

variável TRATAMENTO.

O último caractere do nome do grupo de análise indica a quantidade de pontos de controle que foram associados no processo fotogramétrico nos níveis que utilizam as coordenadas PPK: “BS1”, utiliza um ponto como controle; “BS3” utiliza três pontos e “BC0” não utiliza nenhum ponto como controle — todos os pontos são utilizados como checagem.

Para os produtos do nível “CT”, foram utilizados 60% dos pontos disponíveis em cada cobertura como pontos de controle (40% fazem parte do plano de amostragem de checagem).

Figura 3.9- Fluxograma de geração dos produtos, segundo o TRATAMENTO.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

3.3.3 Plano de amostragem

Plano de amostragem, de acordo com norma ISO 2859-1 (ISO, 1999), é a combinação entre um tamanho de amostra e um critério de aceitação. O plano utilizado na pesquisa baseou-se nas indicações contidas no documento “Avaliação da Qualidade de Dados Geoespaciais” (IBGE, 2019) para inspeção amostral de pontos de controle por área. Considera-se o produto como um lote de inspeção de tamanho (N), formado por células 10x10cm na escala

de análise, em que se deve avaliar uma amostra de tamanho (n), obtida pela observação de um limite de qualidade aceitável (LQA) em um dado nível de inspeção (1, 2 ou 3). No mesmo documento há a indicação de adensamento da amostragem para o nível de células com 4x4 cm na escala de análise, “para aferição de fenômenos contínuos de hidrografia” (IBGE, 2019, p. 32).

De acordo com ISO (1999), o nível de inspeção correlaciona o nível de confiança dos produtos à quantidade amostral de elementos a serem inspecionados. Assim, produtos que sejam considerados consolidados — contando com alta confiabilidade por parte do avaliador — podem ser avaliados por um nível amostral menor, visando otimizar o processo e os custos de inspeção. O ciclo de avaliação inicia no nível 2 e, com a estabilidade dos resultados de avaliação, passa para nível 1, podendo voltar ao nível 2 em caso de mudanças no processo ou problemas de produção; chegando ao nível 3 nas situações em que duas ou mais inspeções de nível 2 tenham tido resultados insatisfatórios; retornando ao nível 2 caso cinco inspeções consecutivas tenham sido aceitas — reiniciando o ciclo.

Na norma ISO 2859-1, o limite de qualidade aceitável (LQA) correlaciona o tamanho de amostra (n) a um número de aceitação (Ac) — que indica a quantidade de elementos não conformes aceitos no plano de amostragem. Sugere-se adotar LQA de 4% e nível 2 de inspeção para a avaliação de qualidade posicional absoluta de produtos geoespaciais (IBGE, 2019).

Nesta investigação, foi usada a escala 1/2.000 como base do plano amostral, devido a esta ser a escala cartográfica sugerida na publicação IPR-726 (DNIT, 2006), para o uso de produtos aerofotogramétricos em projetos executivos de engenharia rodoviária. O procedimento de cálculo seguiu os seguintes passos:

- a) Dado a área de cobertura, por exemplo: $V1V2 = 1,84\text{km}^2$;
- b) Obtém-se a população “N” de 10x10 cm na escala investigada: $1/2.000 = \sim 46$ células;
- c) Verifica-se a quantidade de amostras para lote “N” (46 elementos) na tabela de LQA 4% e nível 2 de inspeção: “n” = 8 e “Ac” = 1 (8 amostras de checagem, podendo aceitar a não conformidade em uma);⁵

A Tabela 3.1 apresenta o resumo das quantidades de pontos e fotos nas coberturas, indicando que o grupo V1V2-CT apresenta 16 pontos de checagem — o dobro da quantidade “n” sugerida pelos cálculos. Esse mesmo grupo apresenta 14 pontos de controle por quilômetro

⁵ No caso do adensamento 4x4 cm seriam 50 pontos de controle, com “Ac” de 5.

quadrado, mantendo a expectativa de se obter mais do que 10 pontos de controle por quilômetro quadrado, seguindo as indicações de Ferrer-González *et al.* (2020).

Em todas as coberturas realizadas, a quantidade de pontos de checagem é maior que a indicada pelo procedimento — via de regra é o dobro.

O plano de amostragem da pesquisa atende às seguintes escalas e níveis de inspeção, conforme IBGE (2019): (1) Escala 1/2.000, LQA 4% no nível 2 de inspeção; e (2) escala 1/1.000, LQA 4% no nível 1 de inspeção.

Convém ressaltar que o plano de amostragem implantado foi planejado visando distribuir os pontos de controle/checagem da pesquisa com a utilização do padrão de 10x10 cm, adequando à amostra para a escala 1/2000. Caso a amostragem considerada fosse baseada em células de 4x4cm, a quantidade de pontos utilizados na pesquisa seria compatível com análise na escala 1/5.000.

A decisão pela utilização do padrão 10x10 cm se deu pela economicidade na etapa de campo a partir da consideração técnica de que a característica topográfica do terreno é suavemente ondulada — caso fosse mais movimentada, teria sido aplicado o esquema de 4x4 cm.

Tabela 3.1 – Resumo quantitativo de elementos nos grupos de análise

ARRANJO DE COLETA: 3 FAIXAS PARALELAS (3F)												
PROCESSAMENTO	SEPARADO								JUNTO			
COBERTURA	V1				V2				V1V2			
ÁREA COBERTA (KM2)	1.06				0.83				1.84			
QUANTIDADE FOTOS	472				367				839			
FOTOS/KM2	445				442				456			
GSD COLETA	2,8 cm											
POSICIONAMENTO FOTOS	PPK			NAV	PPK			NAV	PPK			NAV
QUANTIDADE PTS CONTROLE	0	1	3	14	0	1	3	11	0	1	3	25
QUANTIDADE DE PTS CHECAGEM	24	23	21	10	19	18	16	8	41	40	38	16
CONTROLE/KM2*	445	446	448	13	442	443	446	13	456	457	458	14
CHECAGEM/KM2	23	22	20	9	23	22	19	10	22	22	21	9
TRATAMENTO	BC0	BS1	BS3	CT	BC0	BS1	BS3	CT	BC0	BS1	BS3	CT
GRUPO DE ANÁLISE	V1-BC0	V1-BS1	V1-BS3	V1-CT	V2-BC0	V2-BS1	V2-BS3	V2-CT	V1V2-BC0	V1V2-BS1	V1V2-BS3	V1V2-CT
ARRANJO DE COLETA: FAIXA ÚNICA CENTRAL (FC)												
PROCESSAMENTO	SEPARADO								JUNTO			
COBERTURA	VIC				V2C				V1V2C			
ÁREA COBERTA (KM2)	0.61				0.43				1.02			
QUANTIDADE FOTOS	171				107				278			
FOTOS/KM2	280				249				273			
GSD COLETA	2,8 cm											
POSICIONAMENTO FOTOS	PPK			NAV	PPK			NAV	PPK			NAV
QUANTIDADE DE PTS CONTROLE	0	1	3	14	0	1	3	11	0	1	3	25
QUANTIDADE DE PTS CHECAGEM	24	23	21	10	19	18	16	8	41	40	38	16
CONTROLE/KM2*	280	282	285	23	249	251	256	26	273	274	275	25
CHECAGEM/KM2	39	38	34	16	44	42	37	19	40	39	37	16
TRATAMENTO	BC0	BS1	BS3	CT	BC0	BS1	BS3	CT	BC0	BS1	BS3	CT
GRUPO DE ANÁLISE	V1C-BC0	V1C-BS1	V1C-BS3	V1C-CT	V2C-BC0	V2C-BS1	V2C-BS3	V2C-CT	V1V2C-BC0	V1V2C-BS1	V1V2C-BS3	V1V2C-CT

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

* Considerando como controle os elementos que apresentam correções diferenciais – fotos PPK e marcações RTK.

Mesa-Mingorance e Ariza-López (2020, p. 17) apontam que “só recentemente os padrões de precisão posicional (e.g., UNE 2016, ASPRS 2014) começaram a vincular o tamanho da amostra ao tamanho da área a ser controlada.” Os autores lembram que, tradicionalmente, as normas indicam uma quantidade mínima aceitável — sendo 20 pontos de controle, o valor habitual.

3.3.4 Amostras de levantamentos pelo Método de Monte Carlo

Para a avaliação estatística entre os grupos de análise, foi implementado o Método de Monte Carlo (MMC) com a variação de parâmetros de entrada do processo fotogramétrico, obtendo-se 100 amostras em cada grupo, formado pela associação de COBERTURA e TRATAMENTO, contemplando 24 grupos e totalizando 2400 amostras neste estudo.

A metodologia usada baseou-se em James *et al.* (2016, 2017) e Zhang *et al.* (2019), estudos nos quais o MMC aleatoriza as combinações dos pontos utilizados para controle/checagem e, ao mesmo tempo, aplicam de um erro (*bias*) às posições das fotos e pontos. O valor do *bias* é obtido aleatoriamente de um conjunto de distribuição normal, com média igual a zero e dispersão no valor da precisão do dado de entrada. Os elementos são obtidos a cada otimização da aerotriangulação, etapa em que são recalculados os parâmetros de orientação interior das lentes (POI), refinando as coordenadas da nuvem de pontos de amarração obtidas na aerotriangulação e as posições estimadas das fotos (POE).

Utilizou-se o programa METASHAPE, versão 1.7.4, para implementação do algoritmo do MMC, em que o alinhamento (aerotriangulação) inicial foi realizado com a fixação dos parâmetros apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Parâmetros fixos para o alinhamento das fotos no programa METASHAPE

Accuracy	Hight
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Yes
Key point limit	40.000
Tie point limit	4.000
Guided image matching	No
Adaptative camera model fitting	Yes

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Fixaram-se ainda os parâmetros de otimização descritos na Tabela 3.3 em cada rodada do algoritmo do MMC.

Tabela 3.3 - Parâmetros fixos para a otimização do alinhamento das fotos no programa METASHAPE

Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Fit additional corrections	Yes
Adaptive camera model fitting	No

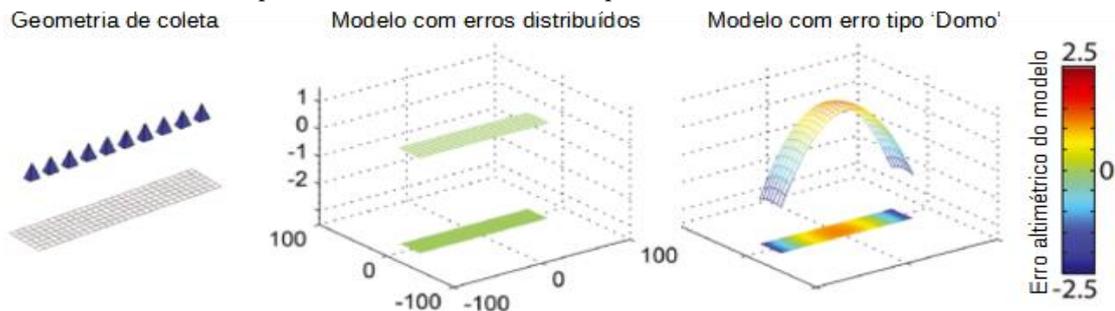
Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A determinação dos parâmetros se baseia nos trabalhos de revisão de Jiang *et al.* (2020), Kerle *et al.* (2019) e Nex e Remondino (2013), bem como em artigos e estudos de casos variados — Martinez *et al.* (2021), Stott *et al.* (2020) e Ferrer-González *et al.* (2020), para citar alguns — além de experiências anteriores do próprio autor no processamento aerofotogramétrico.

A escolha dos valores visou diminuir a possibilidade de obter erros sistemáticos, comumente presentes em produtos gerados pela geometria de coleta em corredores e/ou pela ausência da predeterminação dos parâmetros internos da câmera. O erro do tipo “Domo”, bem delineado nos trabalhos de Sanz-Ablanedo *et al.* (2020), Rehak e Skaloud (2015) e James e Robson (2014), é o exemplo de erro mais conhecido nessas situações.

A Figura 3.10 apresenta, conceitualmente, as diferenças entre um produto que apresenta o erro do tipo Domo e outro em que o erro é distribuído.

Figura 3.10- Efeito do erro tipo ‘Domo’ em um modelo de superfície



Fonte: adaptado de James e Robson (2014).

O efeito das variações nos produtos é medido pela comparação das coordenadas (E,N,H na projeção UTM, FUSO 22 S, Datum SIRGAS2000) acrescidas do valor do *bias* dos pontos de checagem de cada elemento gerado, com suas posições homólogas no produto avaliado (obtidas pela aerotriangulação/ alinhamento das fotos).

A finalidade do MMC é criar amostras da população de levantamentos ARP em corredor a que o levantamento realizado possa pertencer. As características de tais populações contemplam valores métricos (como a precisão das coordenadas dos dados de entrada, os valores de sobreposição da coleta, o GSD, o número de faixas de coleta, a quantidade de pontos de checagem/controle etc.); medidas qualitativas (como a situação de iluminação nas tomadas das fotos ou das condições do tempo etc.) e elementos descritivos, como do equipamento utilizado na coleta: ARP asa fixa, câmera não métrica de distância focal fixa, ausência de *gimbal* estabilizador, receptor GNSS de simples frequência, IMU de baixa precisão, e outros.

O algoritmo do MMC acrescentou o valor de *bias* nos três parâmetros de entrada

do processo fotogramétrico:

a) coordenadas dos pontos (marcações de solo), utilizados tanto para controle quanto para checagem;

b) coordenadas das fotos — tanto aquelas que passaram pelo posicionamento GD-PPK, quanto as que não passaram; e

c) valor de precisão da reamostragem dos pontos de amarração, que James *et al.* (2017a, 2017b) aponta como parâmetro indispensável na implementação de um MMC que reflita a realidade do campo.

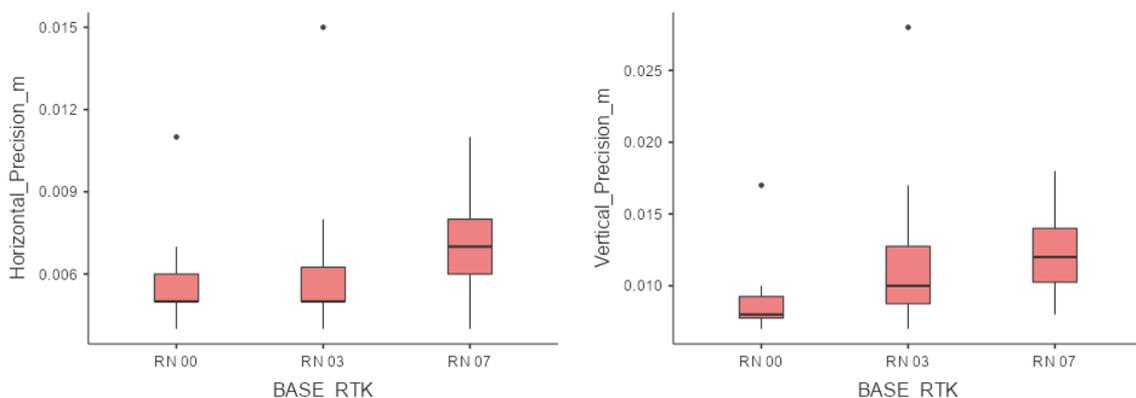
Descreve-se a seguir os valores iniciais desses fatores.

3.3.4.1 Precisão das posições — Marcações de solo

Para o caso das coordenadas das marcações de solo, nas quais se utilizou de um par de receptores GNSS, de dupla frequência, para a determinação das coordenadas (tempo de ocupação, com solução RTK fixa, de 1s e ocupação de um dos três marcos altimétricos de acompanhamento da obra — RN00, RN03, RN07 — como bases dos levantamentos RTK), os valores de *bias* são derivados dos campos *Horizontal_Precision_m* e *Vertical_Precision_m*, disponibilizados pelo processamento dos dados, realizado no programa TOPCON MAGNET OFFICE TOOLS.

A Figura 3.11 apresenta os gráficos *box-plot* das precisões obtidas.

Figura 3.11- Precisões das marcações de solo, gráfico *box-plot*.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Apesar da distribuição de valores indicar presença de *outliers*, tanto na componente vertical quanto na horizontal, os valores não foram tratados. Os maiores valores de precisão,

considerados outliers, na planimetria foram de 1,5 cm e na altimetria de 2,8 cm.

O teste Kruskal-Wallis apontou que planimetricamente as precisões dos dados não apresentaram diferenças significativas entre as bases ($p > 0,05$). Na altimetria, os pontos medidos a partir da Base RN00 têm precisões diferentes da RN07 ($p < 0,05$).

Kruskal-Wallis é utilizado na comparação de três ou mais amostras independentes, avaliando se estas devem ser consideradas como procedentes da mesma população. É uma alternativa à análise de variância (ANOVA), nos casos em que são violadas as pressuposições de normalidade ou homoscedasticidade dos dados, como na presente pesquisa.

Para verificar e garantir a qualidade planimétrica das coordenadas dos marcos RN ocupados na pesquisa, foi executado o posicionamento diferencial estático rápido de cada marco em relação à estação MTGA, pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS em Tempo Real (RBMC-IP), formando linhas de base curtas, ou seja, inferiores a 15 km. A aquisição dos dados da estação de referência do IBGE, foi feita através da internet, com a taxa de 1 Hz.

Foram utilizados receptores GNSS de dupla frequência na ocupação dos marcos, pelo tempo de 20 minutos e taxa de 1 Hz — esses parâmetros estão de acordo com as “Recomendações para levantamentos relativos estáticos — GPS” (IBGE, 2008).

O processamento foi realizado no software *Leica Geo Office* 8.4, obtendo-se a realização planimétrica, que identificou diferenças bidimensionais de 0,04 metros; 0,37 metros e 0,85 metros com relação aos dados originais dos marcos RN00, RN03 e RN07, respectivamente.

A documentação original dos marcos (DNIT, 2018) não identifica o método ou equipamentos utilizados na determinação planimétrica dos marcos RN, fato que impede a avaliação do seu nível de confiabilidade. A tentativa de processamento fotogramétrico com as posições originais dos marcos resultou em erros posicionais da aerotriangulação de até alguns poucos metros, incoerentes com o processo. Diante desses fatos, partiu-se para o uso dos dados reprocessados, obtendo-se, assim, resultados compatíveis com a qualidade subdecimétrica pretendida para o levantamento.

A qualidade altimétrica dos marcos não foi avaliada, tendo sido adotados os valores indicados na documentação da obra; que indica a realização de nivelamento e contranivelamento geométrico, a partir do marco inicial de referência da obra (MO-435), realizado pelo sistema de posicionamento de ponto preciso, fornecido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (PPP-IBGE), a partir de uma sessão única de ocupação, com oito horas de duração. Essa metodologia garante que as altitudes ortométricas dos marcos RN são

precisas, seguindo o terreno natural a partir de uma altitude ortométrica, calculada pela ondulação geoidal fornecida pelo PPP-IBGE (MAPGEO2015, à época do levantamento).

A Tabela 3.4 traz a distribuição final dos pontos utilizados, relacionando as bases RTK com as coberturas, indicando as quantidades de checagem esperada por produto e por conjunto de análise.

Tabela 3.4 - Quantidades de marcações em solo e pontos de checagem ao longo das coberturas realizadas

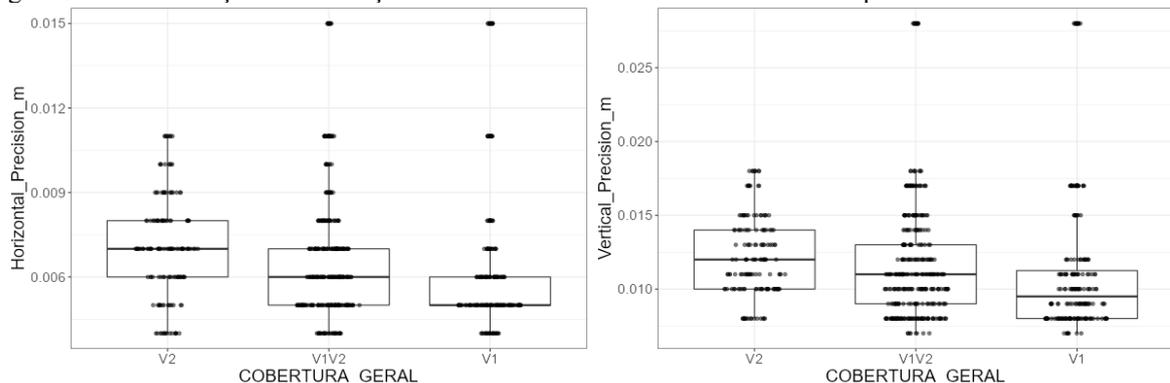
BASE RTK	Distribuição marcações em campo		
	COBERTURA (3 Faixas e Central)		
	V1/V1C	V1V2/V1V2C	V2/V2C
RN00	8	8	0
RN03	12	12	0
RN07	4	21	19
TOTAL	24	41	19
CHECAGEM – BS1 / x100 amostras	23 / 2300	40 / 4000	18 / 1800
CHECAGEM – BS3 / x100 amostras	21 / 2100	38 / 3800	16 / 1600
CHECAGEM – BC0 / x100 amostras	24 / 2400	41 / 4100	19 / 1900
CHECAGEM – CT / x100 amostras	10 / 1000	16 / 1600	8 / 800

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Da Tabela 3.4, as coberturas V1 e V1V2 recobrem pontos coletados a partir das três bases de referência, enquanto as marcações de V2 utilizam unicamente a base RN07.

A Figura 3.12 apresenta a distribuição das precisões planimétricas e altimétricas das marcações de solo ao longo das áreas de cobertura dos voos.

Figura 3.12- Distribuição das marcações e local das bases RTK utilizadas em campo.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

O teste de Kruskal-Wallis apontou que tanto os valores de precisão planimétrica quanto altimétrica são estatisticamente diferentes entre todas as coberturas realizadas. Isso posto, a precisão dos pontos na entrada do MMC foi estatisticamente diferente ao longo das coberturas: a cobertura V1/V1C tem os menores valores de precisão planialtimétrica (são mais precisos) e a V2/V2C tem os maiores — a cobertura V1V2/V1V2C, fruto da combinação dos dados das outras coberturas, apresentou valores intermediários.

De acordo com o Padrão de Acurácia Posicional para Produtos Cartográficos

Digitais (PAP-PCD, EB, 2016), os pontos utilizados no processo de checagem/controle de produtos cartográficos devem apresentar precisão pelo menos três vezes superior ao produto avaliado. A Tabela 3.5 informa os valores das precisões médias para as coberturas de voo e os valores mínimos de precisão que os produtos devem apresentar para que possam ser avaliados pelos conjuntos de pontos coletados, de acordo com proporção de 3x.

Tabela 3.5 – Precisão média dos pontos nas coberturas e respectivos valores 3x

COBERTURA VOO	PLANIMETRIA (2D)		ALTIMETRIA (Z)	
	MÉDIA(m)	3X MÉDIA	MÉDIA (m)	3X MÉDIA
V1	0.0060	0.0181	0.0110	0.0329
V1V2	0.0066	0.0197	0.0116	0.0349
V2	0.0071	0.0212	0.0122	0.0366

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Em linhas gerais, o conjunto de pontos coletados se presta a avaliar produtos com precisões planimétricas a partir de 2 cm e alimétricas a partir de 3,5 cm.

3.3.4.2 Precisão das posições — Fotos

As fotos capturadas nos voos suas têm coordenadas (e respectivas precisões) divididas em duas classes: obtidas diretamente da navegação (NAV) e oriundas do Georreferenciamento Direto (GD), obtido a partir do posicionamento relativo cinemático pós processado (PPK) da trajetória da aeronave. GD compreende o conjunto de processos que realizam a interpolação das posições dos momentos de registro das fotos na trajetória corrigida de voo da aeronave, podendo tal correção ser realizada por posicionamento em tempo real (RTK) ou por pós-processamento (PPK).

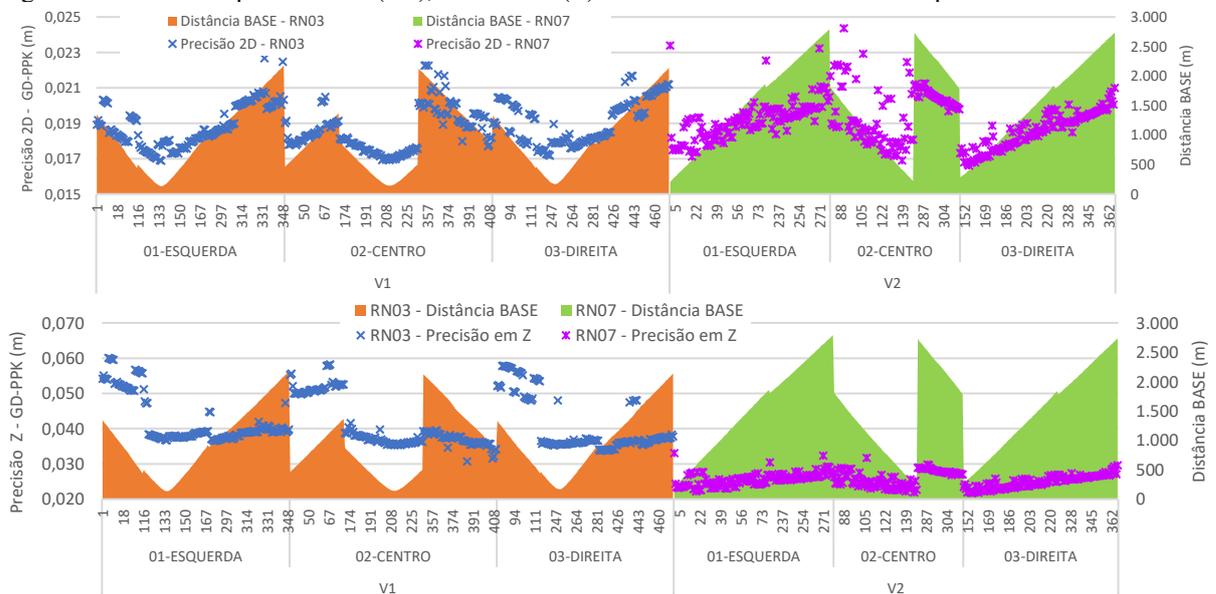
Dos trabalhos de Turner *et al.* (2013), Gabrlik *et al.* (2018) e Losè *et al.* (2020) conclui-se que a avaliação de qualidade do GD é influenciada por dois fatores principais: (1) limitações e características dos métodos de posicionamento (RTK ou PPK), como as taxas de registro GNSS; qualidade do link de rádio; constelações GNSS utilizadas ou, ainda, as distâncias de linha de base e (2) características do conjunto câmera/receptor GNSS utilizado na coleta, em especial erro de sincronismo (entre o momento da tomada da foto e do registro no receptor) e incorreta associação da posição do centro de fase da antena GNSS (obtida pelo posicionamento cinemático), com relação ao centro projetivo (CP) da lente (posição que interessa para o processamento fotogramétrico). Tais fatores podem levar a erros sistemáticos na geração dos produtos, degradando a qualidade do processo e dos produtos dele decorrentes.

A família de aeronaves SenseFly EBEE, à qual pertence o EBEE PLUS (utilizada na pesquisa), é uma das mais presentes em publicações científicas e tem seu desenvolvimento desde o início dos anos 2010. Apesar de ser um conjunto do tipo “caixa preta” — em que pouco se sabe acerca das soluções internas adotadas — é considerado um equipamento de referência, sendo esperado que as questões de sincronismo e posicionamento relativo da antena GNSS com o CP da lente estejam resolvidos.

A ocupação dos marcos de base do processo PPK (RN03 e RN07, voos V1 e V2 respectivamente) se deu através de receptor GNSS, de dupla frequência, com taxa de rastreamento de 1 Hz. A solução da trajetória corrigida PPK (e respectivo GD/RTK das fotos) foi obtida pelo programa senseFly eMotion3. O receptor GNSS da ARP é de simples frequência (L1), implicando que o comprimento máximo da distância entre base e *rover*, para esse tipo de equipamento, seja de até 10 km (IBGE, 2008). Na presente pesquisa, as distâncias de linha de base foram inferiores a 3 km.

A Figura 3.13 apresenta a dispersão da precisão planimétrica e altimétrica do processamento GD das fotos, agrupadas por voo e por linhas de coleta (centro, esquerda e direita), bem como as distâncias de linha de base do processamento PPK.

Figura 3.13- Precisão planimétrica (2D), altimétrica (Z) e distância de linha de base do processamento GD-PPK



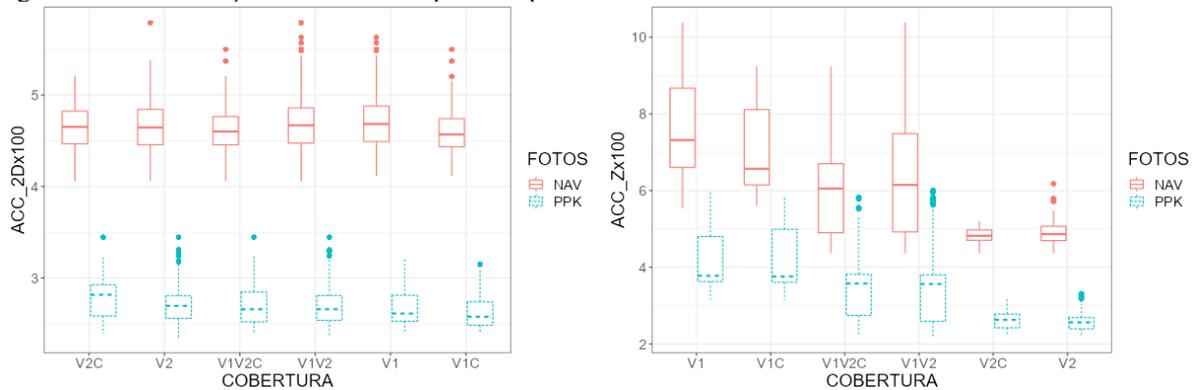
Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A Figura 3.14 apresenta a distribuição das precisões das fotos nos níveis de COBERTURA.

O teste Kruskal-Wallis aponta que as precisões planimétricas das coberturas V1V2 e V1V2C, no caso das fotos PPK, podem ser consideradas iguais. Todo o restante dos valores, tanto na planimetria, quanto na altimetria, são significativamente diferentes.

Isto posto, a precisão das fotos na entrada do MMC é estatisticamente diferente ao longo das coberturas de voo: a cobertura V1 tem os menores valores de precisão planimétrica e a V2 tem os maiores. Para a altimetria a situação é inversa: menores valores para V2 e maiores para V1.

Figura 3.14- Distribuição dos valores de precisão planimétrica e altimétrica das fotos



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Por razões estéticas, os valores PPK são multiplicados por 100x e valores NAV por 1x.

3.3.4.3 Precisão das reprojeções — Pontos de amarração

Giang *et al.* (2018) explicitaram que processo fotogramétrico se baseia em uma sequência de operações sucessivas: extração de pontos de amarração, calibração e orientação da câmera e triangulação de pontos tridimensionais. De acordo com os autores, “como são operações funcionalmente relacionadas, a precisão dos pontos de amarração tem impacto na precisão da calibração/orientação e, finalmente, nos pontos tridimensionais” (2018, p.1).

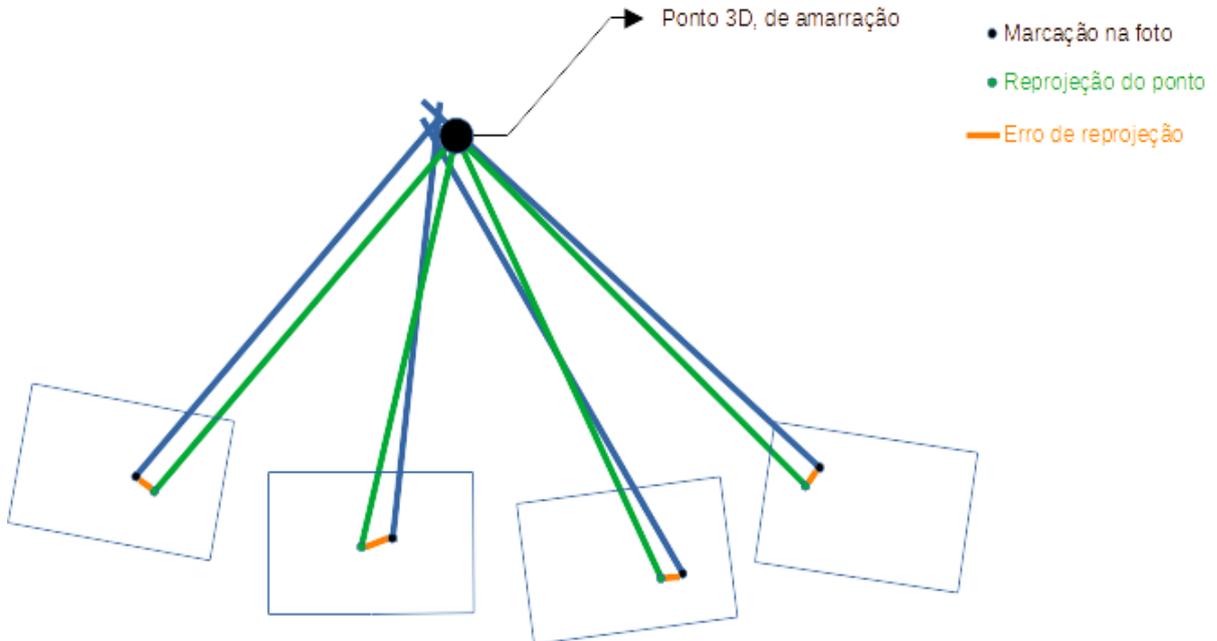
De acordo com o manual do programa METASHAPE, “o erro de reprojeção é a distância entre o ponto na imagem onde um ponto 3D reconstruído pode ser projetado e a projeção original desse ponto 3D, detectado na foto e usado como base para o procedimento de reconstrução” (AGISOFT, 2021). A Figura 3.15 apresenta esquematicamente o erro de reprojeção.

A identificação dos pontos de amarração é realizada pelo algoritmo *Structure from Motion* (SfM), de forma automática. Assim, a medida de erro de reprojeção indica a qualidade do processo SfM (JIANG *et al.*, 2020), com os valores expressos em pixels de imagem.

Já a Figura 3.16 apresenta a distribuição do erro de reprojeção pelas COBERTURAS e TRATAMENTOS desse estudo, evidenciando que os valores de erro de reprojeção são significativamente menores nos levantamentos de linha central. Esse efeito pode ser explicado pelo fato de a cobertura central recobrir menor porção de área vegetada, uma vez

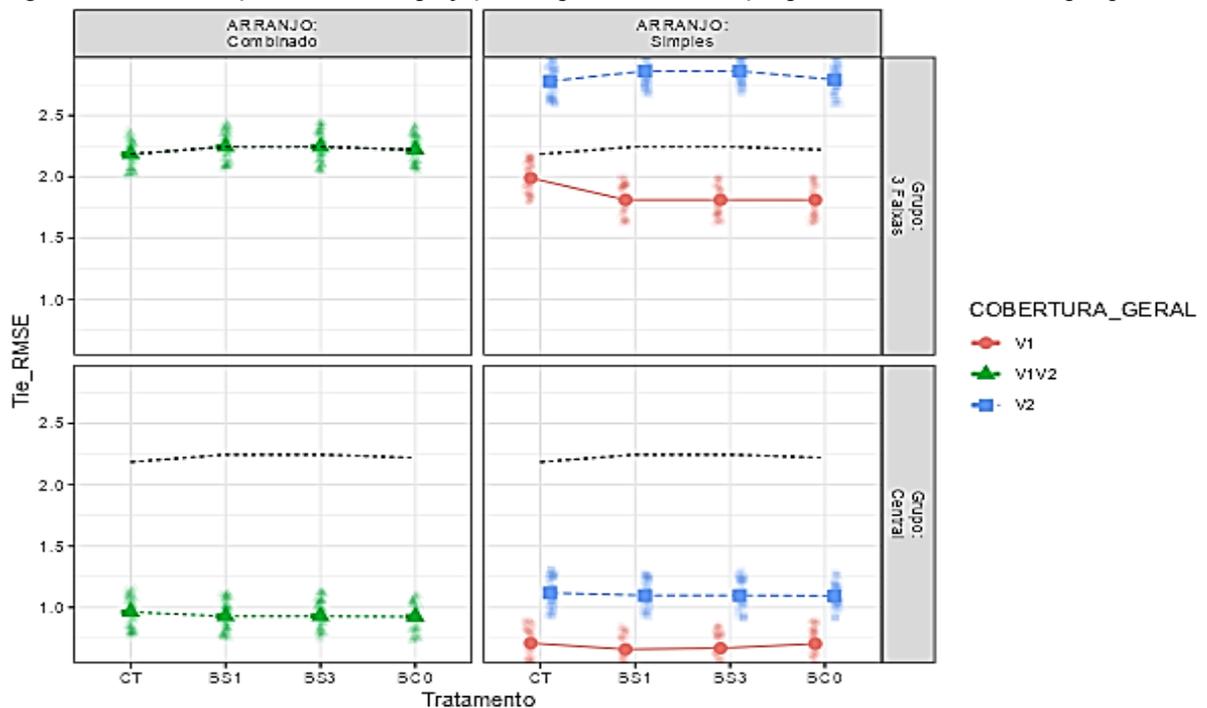
que é centrada na plataforma de rolamento do trecho rodoviário.

Figura 3.15- Representação esquemática do erro de reprojeção de um ponto tridimensional nas fotos



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 3.16- Distribuição do erro de reprojeção dos pontos de amarração pelos níveis de análise da pesquisa.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Zhang *et al.* (2019) indicam que vegetação é uma fonte de problemas para a identificação dos pontos de amarração, já que “há agrupamento de folhas, movimento causado pelo vento e mudança de iluminação, aumentando a complexidade das imagens” (2019, p. 821).

Com relação aos voos, percebe-se que os valores Tie_RMSE de V1 são menores que V2, indicando que V1 é mais preciso que V2. Esse efeito pode ser explicado pela condição de iluminação dos voos, uma vez que V2 foi realizado em horário mais próximo do ocaso.

Com relação à variável TRATAMENTO, o teste Kruskal-Wallis indica que somente há diferença significativa nos dados de processamento com 3 Faixas de V1, onde CT é estatisticamente diferente dos outros níveis.

3.3.4.4 Qualidade geral de entrada no MMC

O Quadro 3.2 resume as qualidades dos dados de entrada, onde o número zero (0) indica ausência de diferença significativa de qualidade entre os níveis e os valores subsequentes indicando a hierarquia qualitativa: 1 melhor que 2 e 2 é melhor que 3.

Quadro 3.2- Resumo qualitativo das precisões de entrada no MMC

Elementos avaliados	GEOMETRIA COLETA		COBERTURA VOO			TRATAMENTO			
	3 Faixas	1 Faixa	V1	V2	V1V2	BC0	BS1	BS3	CT
Precisão Pontos - 2D	0	0	1	3	2	0	0	0	0
Precisão Pontos - Z	0	0	1	3	2	0	0	0	0
Precisão Fotos - 2D	1	2	1	3	2	0	0	0	0
Precisão Fotos - Z	1	2	3	1	2	0	0	0	0
RMSE_TIE	2	1	1	3	2	0	0	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A avaliação qualitativa reflete a precisão do dado — quanto mais preciso, com menor valor, melhor a qualidade. Os valores 0 refletem a ausência de diferenças significativas pelo teste Kruskal-Wallis.

3.3.4.5 Perda de dados pelo MMC

O processamento fotogramétrico, executado através do programa METASHAPE, manteve “parâmetros de referência de acurácia” comuns para todos os processamentos. Tais parâmetros servem como limiares que o sistema utiliza para o aceite dos dados de entrada no processamento. A Figura 3.17 apresenta os valores utilizados no projeto.

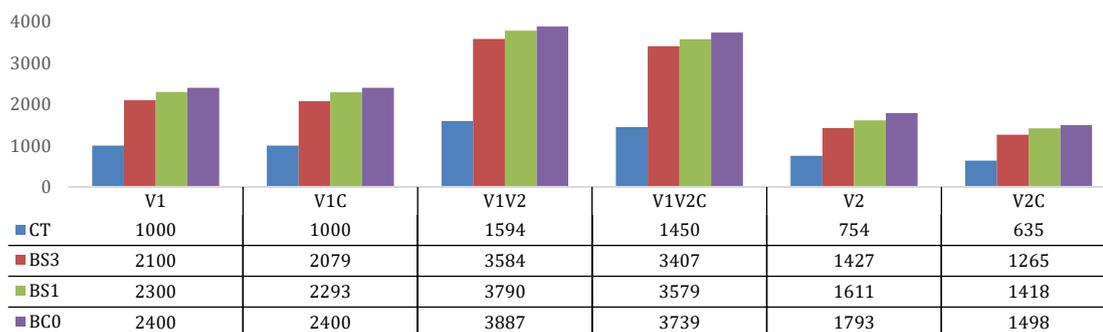
Figura 3.17- Parâmetros de referência da acurácia dos dados de entrada utilizados na pesquisa

Measurement Accuracy		Image Coordinates Accuracy	
Camera accuracy (m):	<input type="text" value="10"/>	Marker accuracy (pix):	<input type="text" value="0.5"/>
Camera accuracy (deg):	<input type="text" value="10"/>	Tie point accuracy (pix):	<input type="text" value="1"/>
Marker accuracy (m):	<input type="text" value="0.005"/>		
Scale bar accuracy (m):	<input type="text" value="0.001"/>		

Fonte: Tela do software METASHAPE (AGISOFT, 2021).

Como o algoritmo do MMC escolhe aleatoriamente quais pontos são utilizados como controle ou checagem no processo fotogramétrico e aplica um valor de erro (*bias*) aos dados, os valores de limiar acabam por excluir alguns pontos da análise por não se adequarem a esses valores *a priori*. A Figura 3.18 apresenta a quantidade de pontos distribuídos por COBERTURA e TRATAMENTO, avaliados na pesquisa como pontos de checagem.

Figura 3.18- Distribuição da quantidade de pontos de checagem ao longo dos grupos de pesquisa



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Comparando os valores obtidos aos esperados (quantidade de pontos de checagem na cobertura multiplicado por 100 amostras do grupo), obtém-se a quantidade percentual de realizações e perdas de pontos de checagem. A Tabela 3.6 indica que somente a cobertura V1 realizou 100% da quantidade esperada de checagem (0% de perda) em todos os tratamentos; a cobertura V2C perdeu ~21% dos pontos de checagem previstos e que o conjunto V2/V2C perdeu ~15% de pontos.

Tabela 3.6 - Quantidade percentual pontos de checagem realizados e perdidos, em comparação ao total esperado

TRATAMENTO	COBERTURA					
	V1	V1C	V1V2	V1V2C	V2	V2C
% realizado - CT	100.00%	100.00%	99.63%	90.63%	94.25%	79.38%
% realizado - BS3	100.00%	99.00%	94.32%	89.66%	89.19%	79.06%
% realizado - BS1	100.00%	99.70%	94.75%	89.48%	89.50%	78.78%
% realizado - BC0	100.00%	100.00%	94.80%	91.20%	94.37%	78.84%
% perda média – COBERTURA (3Faixas ou Central)	0.00%	0.33%	4.13%	9.76%	8.17%	20.99%
% perda média – COBERTURA (3Faixas e Central)	0.16%		6.94%		14.58%	

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

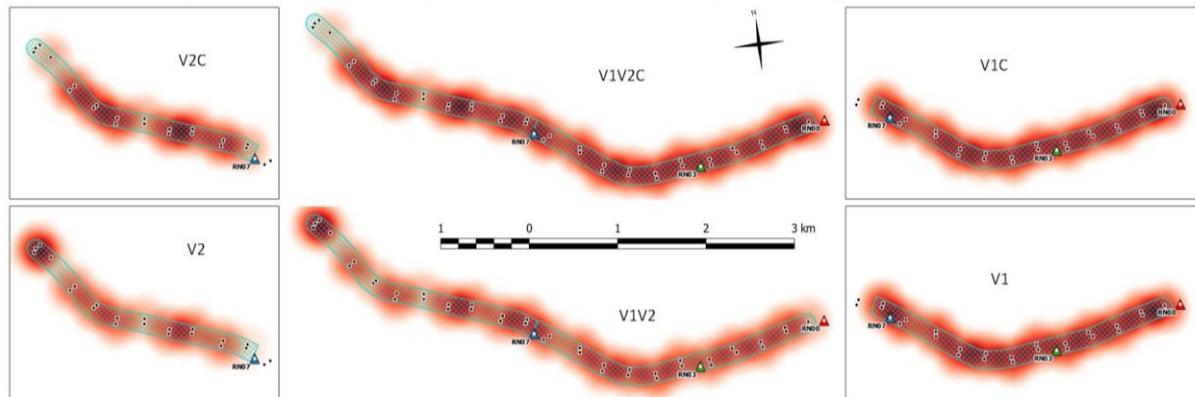
A avaliação dos dados aponta que o efeito da perda de pontos de checagem só é perceptível ao longo dos níveis da variável COBERTURA, já que o teste T de student indica não haver diferenças estatisticamente significativas entre os níveis de TRATAMENTO.

A perda de elementos causou falhas de distribuição espacial dos pontos de checagem, conforme apresenta a Figura 3.19. Essa falha de distribuição aponta que a

confiabilidade da avaliação é espacialmente discrepante ao longo das coberturas:

- a) V1 e V1C apresentam confiabilidade bem distribuída ao longo de toda cobertura;
- b) as coberturas V2 e V2C apresentam menor confiabilidade nas suas bordas, em especial V2C na região do encabeçamento da ponte sobre o rio Araguaia (final do trecho); e
- c) as coberturas V1V2 e V1V2C mesclam as características das anteriores.

Figura 3.19- Hotspots da distribuição espacial dos pontos de checagem ao longo das coberturas



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Não houve casos de elementos amostrais com ausência de dados, apesar da falha espacial no aproveitamento de marcações em algumas amostras da pesquisa, evidenciando que o MMC foi bem-sucedido em povoar todos os grupos de análise.

3.3.5 Comparações entre coberturas e tratamentos aerofotogramétricos

3.3.5.1 Avaliação de tendência

O termo “Tendência” reflete a presença de erro sistemático nos resultados planimétricos e/ou altimétricos da avaliação de qualidade, fazendo com que os mesmos percam a capacidade refletirem a realidade — sendo considerados não acurados.

No artigo “Acurácia e precisão: Revendo os conceitos de forma acurada”, os autores indicam que

[...] a relevância em se detectar a existência de tendência num conjunto de medidas ou num sistema está vinculada com o fato de se tornar possível identificar problemas no equipamento de medida (devido a, por exemplo: falta de calibração e desgaste natural) ou no modelo vinculado ao sistema sendo usado (por exemplo, parametrização inadequada). Isto é muito importante nas análises vinculadas ao estabelecimento de novas tecnologias e metodologias. (GALERA MONICO *et al.*, 2009, p. 476).

A avaliação do erro sistemático é realizada nos resultados da qualidade posicional absoluta, que é obtida “das diferenças entre as coordenadas de feições em uma fonte de maior referência e seus pontos homólogos no produto avaliado” (EB, 2016). No caso dessa pesquisa o produto de referência é o das marcações de campo utilizadas como checagem, realizadas por posicionamento GNSS-RTK. Calculou-se a raiz do erro quadrático médio (RMSE) como parâmetro de avaliação da qualidade posicional absoluta. Sequência de cálculos para a obtenção do RMSE:

- a) Cálculo das dispersões (d);

$$d_{eixo_i} = MD_{eixo_i} - CA_{eixo_i} \quad (2)$$

- b) Cálculo das resultantes planimétricas (d_{2D}) das dispersões para cada ponto;

$$d_{2D_i} = \sqrt{d_{x_i}^2 + d_{y_i}^2} \quad (3)$$

- c) Cálculo das resultantes tridimensionais (d_{3D}) das dispersões para cada ponto;
e

$$d_{3D_i} = \sqrt{d_{x_i}^2 + d_{y_i}^2 + d_{z_i}^2} \quad (4)$$

- d) Cálculo do RMSE para os conjuntos de dados.

$$RMSE_{tipo} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{tipo_i})^2}{n}} \quad (5)$$

Onde: *eixo* representa os eixos X, Y e Z (paralelos aos eixos UTM-E, UTM-N e Zenital Geoidal, respectivamente); *i* representa os pontos homólogos, *MD* representa os valores obtidos nos produtos dos grupos; *CA* os valores obtidos na coleta das coordenadas das marcações de campo e *tipo* refere-se aos eixos (X, Y, Z) ou às resultantes (2D, 3D) das dispersões.

Cada amostra da pesquisa, formada pela combinação de COBERTURA e TRATAMENTO, tem seu conjunto de pontos de checagem avaliado. A Tabela 3.7 apresenta a quantidade máxima de pontos por amostra — a quantidade efetiva variou de acordo com os parâmetros de processamento, conforme já apresentado no texto.

Tabela 3.7 - Quantidade máxima de pontos por amostras

TRATAMENTO	COBERTURA		
	V1/V1C	V1V2/V1V2C	V2/V2C
BS1	23	40	18
BS3	21	38	16
BC0	24	41	19
CT	10	16	8

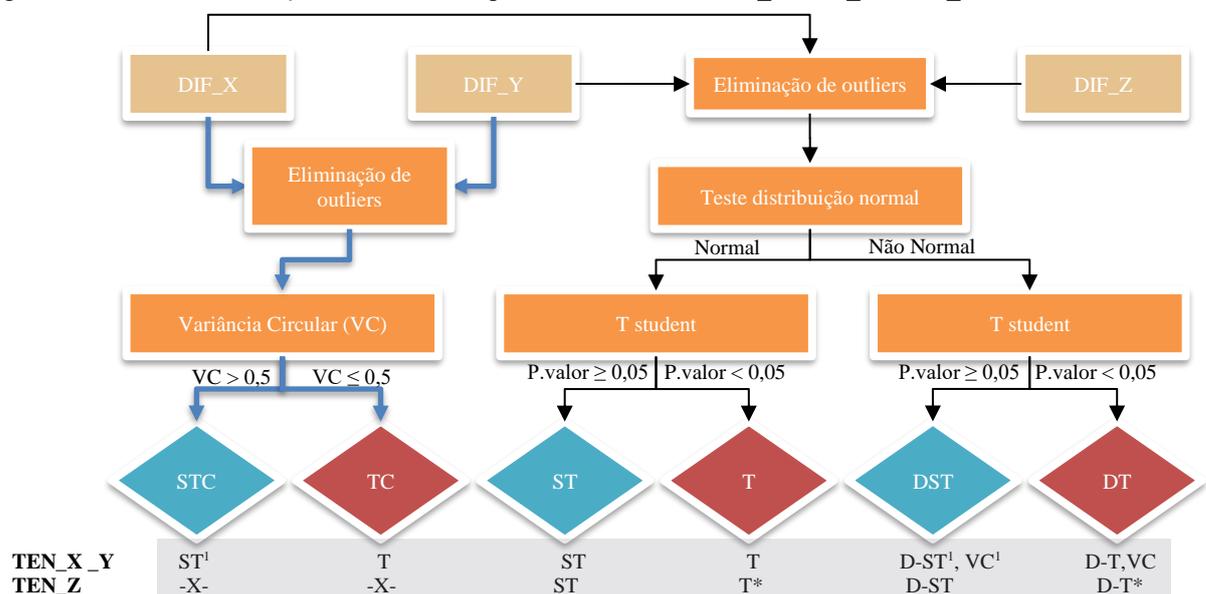
Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A tendência nos dados da pesquisa é avaliada tanto pelo teste t de student (onde $p \geq 0,05$ indica ausência planimétrica ou altimétrica do problema em dados com distribuição normal) quanto pela Variância Circular (VC), conforme proposto por Santos *et al.* (2016), em que $VC > 0,5$ indicaram ausência de erro sistemático planimétrico.

Foram avaliadas as discrepâncias dos conjuntos nos sentidos dos eixos da projeção UTM (N, E Z): DIF_X, DIF_Y, DIF_Z. O resultado foi armazenado nas variáveis TEN_X, TEN_Y e TEN_Z, respectivamente.

A Figura 3.20 apresenta o fluxograma de avaliação da tendência.

Figura 3.20- Fluxo de avaliação da tendência a partir dos valores de DIF_X, DIF_Y e DIF_Z



¹ 'ST' indica produtos sem tendência; 'T' indica produtos com tendência; '-X-' indica não avaliado; 'D-' indica resultados provenientes de amostras sem distribuição normal; 'VC' indica que o resultado é o da Variância Circular (VC).

*Nos resultados tendenciosos da altimetria foi realizada a avaliação da translação dos valores pelo valor médio da discrepância para eliminação da tendência.

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A eliminação de outliers foi pelo módulo de Z score ($|Z|$), onde valores maiores que três vezes $|Z|$ foram desconsiderados na análise. O Z score é calculado pela comparação do valor do elemento com relação à média e o desvio padrão do conjunto:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (6)$$

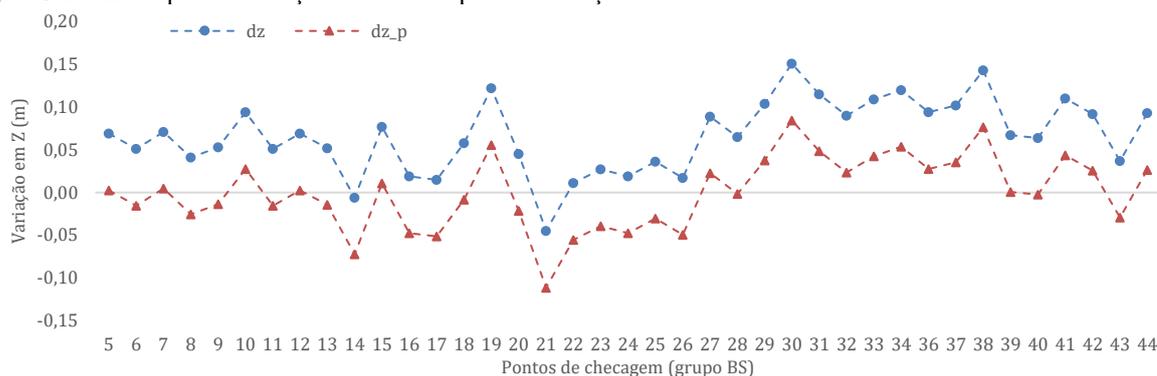
Onde x é o valor do elemento avaliado; μ é a média do conjunto e σ é o desvio padrão da média. Conjuntos com menos de 5 elementos não foram avaliados quanto a presença de outliers — todos os dados foram utilizados.

3.3.5.2 Teste translação altimétrica

Na avaliação de tendência altimétrica investigou-se a estratégia de translação dos conjuntos tendenciosos pela média das discrepâncias para eliminação dos erros sistemáticos.

Como exemplo, a Figura 3.21 apresenta a comparação dos dados originais da diferença altimétrica (d_z) com aqueles obtidos pelo procedimento teste (d_{z_p}) para uma amostra da pesquisa, pertencente ao grupo BC0. A translação altimétrica nesse caso foi de $\sim -6,64$ cm.

Figura 3.21- Exemplo de variação altimétrica para eliminação de tendência



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Foi utilizada a resposta do teste t de student nos dados com distribuição normal como parâmetro de aceite ($p \geq 0,05$) da ausência de tendência. O procedimento foi realizado nos conjuntos das divergências altimétricas com indicação de tendência: “T” e “D-T”, da variável TEN_Z. O resultado foi armazenado na variável TESTE_Z.

A Tabela 3.8 apresenta a distribuição dos níveis de resposta da avaliação.

Tabela 3.8 - Distribuição das amostras nos níveis de TESTE_Z

Nível	Qdt	% Total	% Acumulado
D-ST	152	6.3 %	6.3 %
D-TT	133	5.5 %	11.9 %
ST	1465	61.0 %	72.9 %
STT	650	27.1 %	100.0 %

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Os níveis de TESTE_Z indicam:

- a) ST — Conjunto sem tendência desde o início do processo, com distribuição normal;
- b) D-ST — Conjunto sem tendência desde o início do processo, sem distribuição normal;
- c) STT — Conjunto que com o procedimento de translação não apresenta mais tendência (com distribuição normal); e
- d) D-TT — Conjunto passou pelo procedimento de translação, mas continuou a

apresentar erro sistemático (não apresenta distribuição normal).

Da tabela: ~33% das 2400 amostras da pesquisa apresentaram tendência altimétrica e passaram pelo procedimento de translação (soma dos níveis STT e D-TT). Nesse subconjunto, em ~83% dos casos, o procedimento eliminou a tendência (nível STT) e nos ~17% restantes o erro sistemático persistiu (nível D-TT).

Para avaliar quais níveis de COBERTURA e TRATAMENTO apresentam maiores probabilidades de necessitar de translação altimétrica foi realizada uma regressão logística da variável TESTE_Z, tendo como fatores os níveis das variáveis COBERTURA e TRATAMENTO.

A regressão logística é um modelo estatístico que pode ser usado para estimar a chance da ocorrência de um determinado desfecho categórico (Y) em função de um ou mais preditores (X), contínuos ou categóricos.⁶ Quando a variável dependente apresenta apenas dois níveis, a regressão é chamada de binária; quando apresenta mais níveis, é chamada de multinomial.

Utilizou-se o software livre de análises estatísticas JAMOVI (The Jamovi Project, 2021) para a implementação e análise do modelo de regressão logística. A Tabela 3.9 apresenta as medidas de ajuste da regressão multinomial — uma vez que TESTE_Z apresenta 4 níveis.

Tabela 3.9 - Medidas de ajuste da regressão logística multinomial da variável TESTE_Z

Modelo de Regressão	Deviance	AIC	R ² _N	Significância geral do modelo		
				χ^2	df	p
TESTE_Z (COBERTURA, TRATAMENTO)	3342	3396	0.35	1410	24	< .001
Teste Omnibus dos coeficientes do modelo						
Predictor	χ^2		df	p		
COBERTURA	774.30		15	< .001		
TRATAMENTO	746.75		9	< .001		

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

O teste de significância geral do modelo, também conhecido como Omnibus (terminologia usual no pacote SPSS), compara a variância do modelo com variáveis independentes e o modelo nulo (em que não se utiliza tais variáveis).

Os Testes Omnibus de Coeficientes do Modelo são usados para verificar se o modelo com variáveis explicativas incluídas é uma melhoria em relação ao modelo de linha de base. “Aplicam-se testes de qui-quadrado para ver se há uma diferença significativa entre as

⁶ Descrição baseada na publicação “Conceitos e análises estatísticas com R e JASP”. Disponível em: <https://anovabr.github.io/mqt/regress%C3%A3o-log%C3%ADstica-bin%C3%A1ria.html>. Acesso em: 13/02/2022.

probabilidades de log (especificamente os -2LLs) do modelo de linha de base e o novo modelo. Se o novo modelo tiver um -2LL significativamente reduzido em comparação com a linha de base, isso sugere que o novo modelo está explicando mais a variação no resultado” (RESTORE, 2011, p. 13).

Os resultados indicam que a influência das variáveis independentes (COBERTURA e TRATAMENTO) é significativa na variação de resposta TESTE_Z.

O pseudo R^2 (Nagelderke) do modelo é de 0,35. A Tabela 3.10 apresenta os coeficientes obtidos na regressão. Importante salientar que o programa JAMOVI utiliza o valor 1 na razão de chances (ODDS RATIO) no qual nenhuma mudança é percebida — diferentemente de outros programas, em que o valor é 0.

Tabela 3.10 - Coeficientes da regressão logística multinominal da variável TESTE_Z

TESTE_Z	Preditor	Estimativa	SE	Z	p	Odds ratio	Intervalo de confiança 95%		
							Inferior	Superior	
D-ST - ST	Intercepto	-3.54	0.38	-9.35	< .001	0.03	0.01	0.06	
	Cobertura:								
	V1C – V1	2.63	0.38	6.91	< .001	13.89	6.59	29.30	
	V1V2 – V1	1.53	0.41	3.73	< .001	4.61	2.06	10.31	
	V1V2C – V1	0.87	0.53	1.65	0.10	2.40	0.85	6.79	
	V2 – V1	0.54	0.48	1.12	0.26	1.72	0.67	4.42	
	V2C – V1	0.92	0.44	2.10	0.04	2.51	1.07	5.91	
	Tratamento:								
	BC0 – CT	-2.13	0.53	-4.00	< .001	0.12	0.04	0.34	
	BS1 – CT	-0.06	0.22	-0.27	0.79	0.94	0.61	1.46	
BS3 – CT	-0.08	0.22	-0.36	0.72	0.92	0.60	1.42		
D-TT - ST	Intercepto	-8.46	1.08	-7.85	< .001	0.00	0.00	0.00	
	Cobertura:								
	V1C – V1	2.37	1.07	2.22	0.03	10.64	1.31	86.22	
	V1V2 – V1	1.76	1.13	1.57	0.12	5.84	0.64	52.94	
	V1V2C – V1	6.45	1.02	6.31	< .001	631.42	85.17	4681.19	
	V2 – V1	3.13	1.04	3.00	0.00	22.77	2.95	176.00	
	V2C – V1	2.21	1.08	2.05	0.04	9.08	1.10	74.80	
	Tratamento:								
	BC0 – CT	2.61	0.47	5.55	< .001	13.56	5.40	34.07	
	BS1 – CT	3.64	0.42	8.73	< .001	38.13	16.83	86.37	
BS3 – CT	0.61	0.50	1.22	0.22	1.83	0.69	4.87		
STT - ST	Intercepto	-3.72	0.23	-16.10	< .001	0.02	0.02	0.04	
	Cobertura:								
	V1C – V1	0.14	0.25	0.56	0.57	1.15	0.70	1.89	
	V1V2 – V1	1.87	0.22	8.36	< .001	6.52	4.20	10.11	
	V1V2C – V1	3.29	0.24	13.99	< .001	26.97	17.00	42.80	
	V2 – V1	2.20	0.22	9.86	< .001	9.03	5.83	13.98	
	V2C – V1	1.40	0.23	6.19	< .001	4.05	2.60	6.30	
	Tratamento:								
	BC0 – CT	2.99	0.18	16.89	< .001	19.89	14.06	28.14	
	BS1 – CT	0.37	0.20	1.91	0.06	1.45	0.99	2.12	
BS3 – CT	0.83	0.17	4.88	< .001	2.30	1.65	3.22		

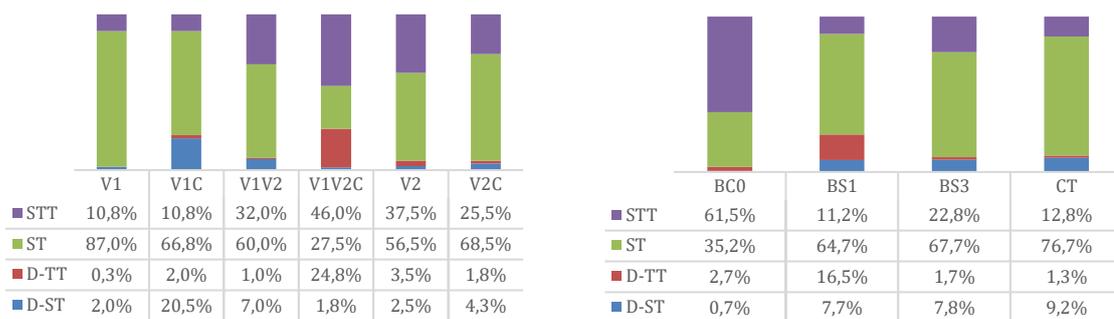
Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Dos resultados da regressão: levantamentos baseados no TRATAMENTO BC0

apresentam maior probabilidade (61% STT) de necessitar passar pelo procedimento de translação altimétrica pela média das divergências para apresentar dados sem tendências, enquanto aqueles que seguiram o TRATAMENTO CT, têm probabilidade de 13% (STT) e BS1 apresentaram 11,2% (STT). Em termos de chances comparadas ao tratamento CT, BC0 é o que está mais distante — apresentando 20x mais chances de necessitar translação — e BS1 é a que mais se assemelha, tendo 1,45x mais chances.

Destaca-se que levantamentos que se assemelhem à COBERTURA V1V2C têm maiores possibilidades de, mesmo passando pelo procedimento de translação, continuarem a apresentar erro sistemático (25% D-TT) — as chances são 630x maior do que levantamentos semelhantes à COBERTURA V1. A Figura 3.22 p traz os gráficos das probabilidades de ocorrência dos níveis de TESTE_Z entre as variáveis COBERTURA e TRATAMENTO.

Figura 3.22- Probabilidade dos níveis de COBERTURA e TRATAMENTO apresentar as respostas do TESTE_Z.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

3.3.5.3 Avaliação binomial de tendência — presença/ausência

Regressões logísticas binárias, diferentemente das multinominais, possibilitam medir a exatidão esperada dos seus resultados e a qualidade da distinção entre os níveis do binômio. Por essas razões a pesquisa apresenta avaliações de presença/ausência de tendência planimétrica e altimétrica pelas variáveis dicotômicas TEN_2D e TEN_Z_bin, respectivamente.

A variável binária TEN_2D representa a avaliação planimétrica em dois níveis (Pass/Out), onde o nível “Out” indica a presença de tendência e o nível “Pass” indica ausência de tendência. O Quadro 3.3 apresenta as combinações dos níveis de TEN_X, TEN_Y e VC para a obtenção de TEN_2D.

Quadro 3.3- Combinações de TEN_X, TEN_Y e VC para a obtenção de TEN_2D.

TEN_X	TEN_Y	VC	TEN_2D
ST	ST	*VC	Pass
ST	D-ST	STC	Pass
ST	D-T	STC	Pass
ST	D-ST	TC	Out
ST	D-T	TC	Out
T	ST	*VC	Out
T	T	*VC	Out
T	D-ST	*VC	Out
T	D-T	*VC	Out
*D	*D	STC	Pass
*D	*D	TC	Out

TEN_X	TEN_Y	VC	TEN_2D
ST	ST	*VC	Pass
D-ST	ST	STC	Pass
D-T	ST	STC	Pass
D-ST	ST	TC	Out
D-T	ST	TC	Out
ST	T	*VC	Out
T	T	*VC	Out
D-ST	T	*VC	Out
D-T	T	*VC	Out
*D	*D	STC	Pass
*D	*D	TC	Out

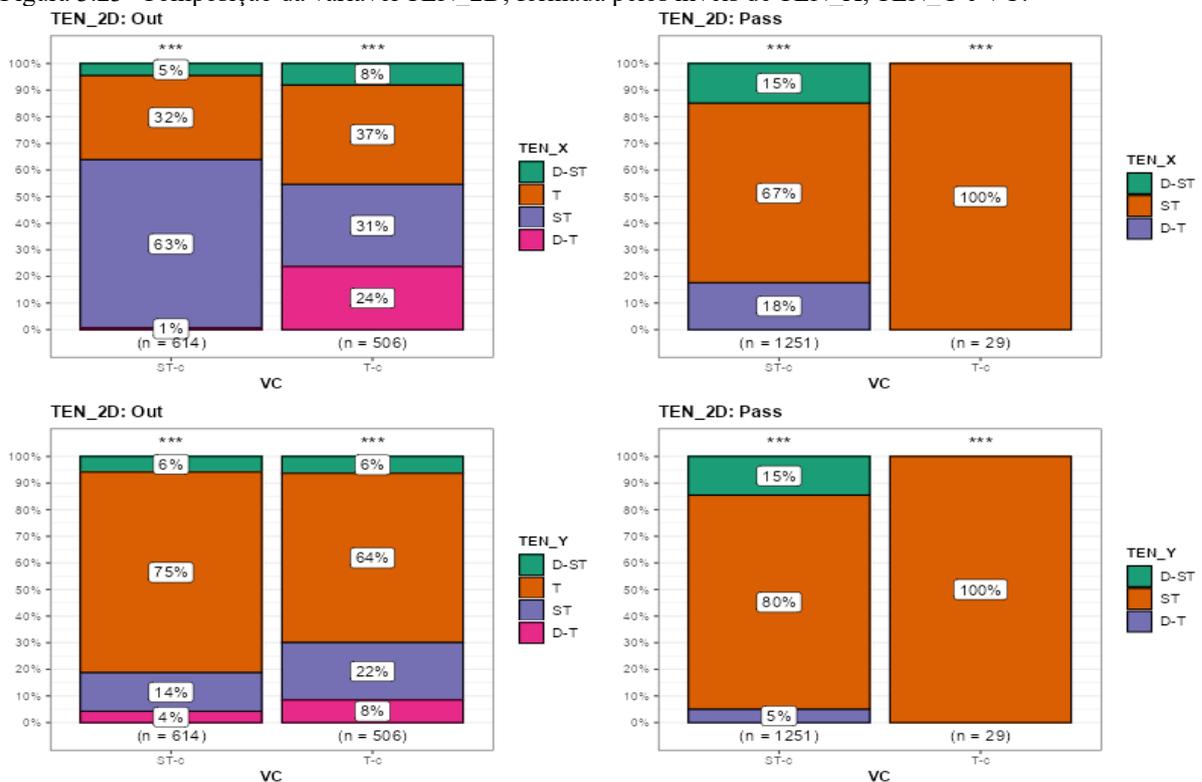
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

*VC indica qualquer valor de VC (STC ou TC).

*D indica qualquer valor que apresente distribuição não normal (D-T ou D-ST).

A Figura 3.23 apresenta a distribuição percentual das amostras de TEN_X, TEN_Y e VC na variável TEN_2D.

Figura 3.23- Composição da variável TEN_2D, formada pelos níveis de TEN_X, TEN_Y e VC.

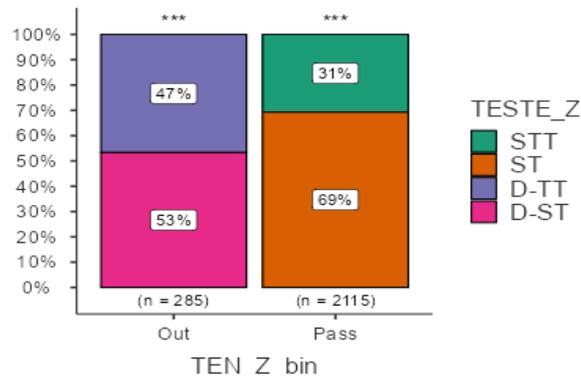


Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A partir dos níveis de TESTE_Z, foi codificada a variável binária TEN_Z_bin, onde

o nível “Out” agrupa os resultados D-ST (considerado fora da análise por não apresentar distribuição normal) e D-TT (considerados fora da análise por apresentar tendência) e o nível “Pass” agrupa os resultados ST e STT, considerados aprovados (amostras livres de tendência altimétrica). A Figura 3.24 apresenta a composição da variável TEN_Z_bin.

Figura 3.24- Composição da variável TEN_Z_bin a partir dos níveis de TESTE_Z



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

3.3.5.4 Tendência altimétrica

Para avaliar quais níveis de COBERTURA e TRATAMENTO apresentam as maiores probabilidades de gerar dados com tendência altimétrica, realizou-se uma regressão logística binomial da variável TEN_Z_bin, considerando “Pass” como nível de referência e tendo como fatores os níveis das variáveis COBERTURA e TRATAMENTO.

Os pressupostos verificados para a execução da regressão binomial logística foram os seguintes:

- Os dados são aleatórios e representativos da população;
- A variável dependente é dicotômica/binária;
- Os preditores (variáveis independentes) não apresentam valores altos de correlação entre eles; e
- Há uma relação linear entre preditores contínuos e o logit do desfecho.

O conjunto de dados atende a todos os pressupostos avaliados. A Tabela 3.11 apresenta as medidas de ajuste obtidos na regressão.

O resultado indica que o modelo apresenta um bom ajuste geral aos dados de entrada, uma vez que há significância no Omnibus ($p < 0.001$).

Já a significância do teste Omnibus dos coeficientes do modelo ($p < 0.001$) permite

concluir que as variáveis independentes (COBERTURA e TRATAMENTO) influenciam significativamente na variação da variável dependente (TESTE_Z_bin).

Tabela 3.11 - Medidas de ajuste da regressão logística binomial da variável TEN_Z_bin.

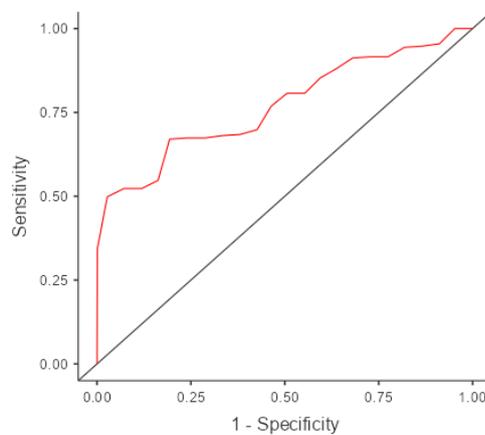
Modelo de Regressão	Desvio	AIC	R ² _N	ACC	Significância do teste		
					χ^2	df	p
TEN_Z_bin (COBERTURA, TRATAMENTO)	1418	1436	0,25	0,67	331	8	< .001
Teste Omnibus dos coeficientes do modelo							
Predictor	χ^2		df	p			
COBERTURA	200,37		5	< .001			
TRATAMENTO	142,91		3	< .001			

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

O modelo apresenta pseudo R² (Nagelderke) de 0,25 e capacidade de predição com 67% de acurácia. A Curva Característica de Operação do Receptor (*Receiver Operating Characteristic Curve*), curva ROC, da regressão é apresentada na Figura 3.25.

O valor da “*Area Under the ROC curve*” (AUC), que infere a qualidade de discriminação entre os valores binários avaliados, é de 0,77. Esse valor indica modelo com capacidade aceitável de discriminar “Pass/Out”, conforme os limiares propostos por Hosmer e Lemeshow (2000), apontados na Tabela 3.12.

Figura 3.25- Curva ROC da regressão binomial logística de TEN_Z_bin



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Tabela 3.12 - Limiares de AUC para discriminar entre os valores binários avaliados.

AUC < 0,7	Baixa capacidade de discriminação (mesmo que jogar uma moeda para o alto)
0,7 ≤ AUC < 0,8	Discriminação aceitável
0,8 ≤ AUC < 0,9	Discriminação excelente
AUC ≥ 0,9	Discriminação fora de série

Fonte: Adaptada de Hosmer e Lemeshow (2000), pg.177

A Tabela 3.13 apresenta os coeficientes obtidos na regressão logística binomial.

Tabela 3.13 - Coeficientes da regressão logística binomial da variável TEN_Z_bin.

Preditor	Estimativa	SE	Z	p	Odds ratio	Intervalo de confiança 95%	
						Inferior	Superior
Intercepto	-4.032	0.364	-11.09	<.001	0.0177	0.0087	0.0362
Cobertura:							
V1C – V1	2.673	0.363	7.358	<.001	14.4882	7.10808	29.5308
V1V2 – V1	1.368	0.389	3.52	<.001	3.927	1.83339	8.4113
V1V2C – V1	2.918	0.362	8.069	<.001	18.4981	9.10592	37.5778
V2 – V1	1.045	0.402	2.602	0.009	2.8437	1.29411	6.249
V2C – V1	1.045	0.402	2.602	0.009	2.8437	1.29411	6.249
Tratamento:							
BC0 – CT	-1.29	0.269	-4.787	<.001	0.2754	0.16241	0.4669
BS1 – CT	1.134	0.175	6.493	<.001	3.1078	2.20706	4.3762
BS3 – CT	-0.121	0.201	-0.601	0.548	0.8864	0.59824	1.3134

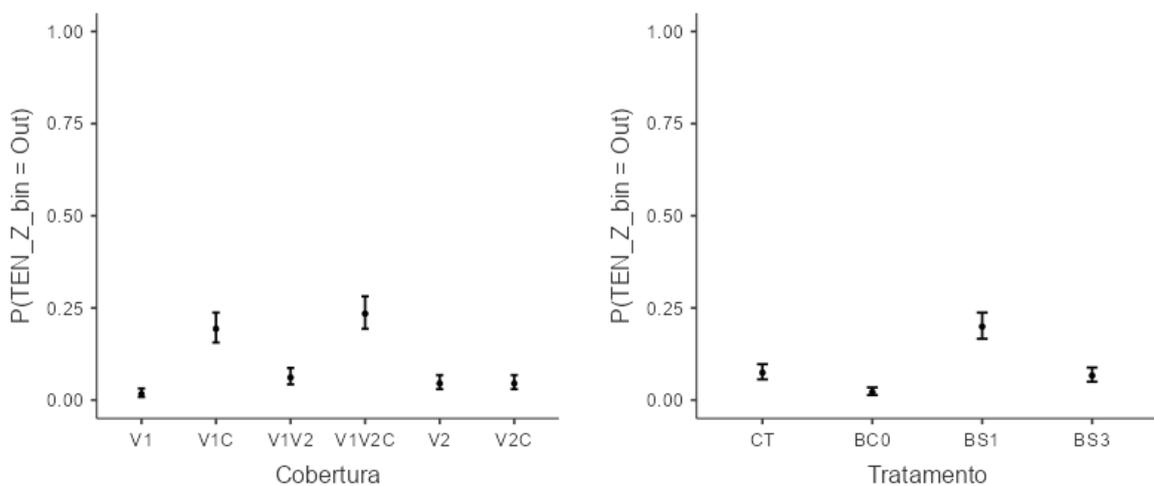
Nota. As estimativas representam as chances (Odds) de "TEN_Z_bin = Out" vs. "TEN_Z_bin = Pass"
 Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A conversão das chances em probabilidades é apresentada em forma de gráfico, na Figura 3.26. Da regressão:

a) em relação ao TRATAMENTO CT, o tratamento BS1 apresenta chances estatisticamente maiores ($p < 0,05$) de gerar dados com tendência (3X mais chances), enquanto BC0 apresenta $\sim 1/4$ das chances e BS3 apresenta chances iguais ($p \geq 0,05$); e

b) com relação a COBERTURA V1, todas os outros níveis de cobertura apresentam chances estatisticamente maiores de obter dados tendenciosos ($p < 0,05$), sendo que V1V2C apresenta 18x mais chances de gerar dados com tendência altimétrica.

Figura 3.26- Probabilidade dos diferentes níveis de COBERTURA e TRATAMENTO apresentar tendência altimétrica.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

3.3.5.5 Tendência planimétrica

Realizou-se uma regressão logística binomial da variável TEN_2D, considerando o “Pass” como nível de referência e tendo como fatores os níveis das variáveis COBERTURA e TRATAMENTO. Os pressupostos da regressão binomial logística elencados na regressão da variável TEN_Z_bin foram verificados, com o conjunto de dados atendendo a todos.

A Tabela 3.14 apresenta as medidas de ajuste da regressão.

Tabela 3.14 - Medidas de ajuste da regressão logística binomial da variável TEN_2D.

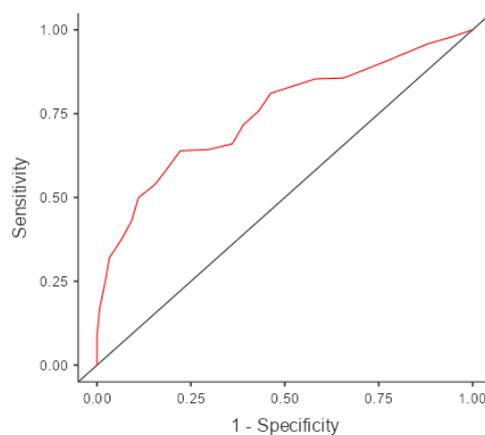
Modelo de Regressão	Desvio	AIC	R ² _N	ACC	Significância do teste		
					χ^2	df	p
TEN_Z_bin (COBERTURA, TRATAMENTO)	2877	2895	0,22	0,67	438	8	<.001
Teste Omnibus dos coeficientes do modelo							
Predictor	χ^2		df		p		
COBERTURA	285,73		5		<.001		
TRATAMENTO	171,97		3		<.001		

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

O resultado indica que o modelo apresenta um bom ajuste geral aos dados de entrada, uma vez que há significância no Omnibus ($p < 0.001$).

Já a significância do teste Omnibus dos coeficientes do modelo ($p < 0.001$) permite concluir que as variáveis independentes (COBERTURA e TRATAMENTO) influenciam significativamente a variação da variável dependente (TEN_2D). O modelo apresenta pseudo R² (Nagelderke) de 0,22 e capacidade de predição com 67% de acurácia. A curva ROC, da regressão é apresentada na Figura 3.27.

Figura 3.27- Curva ROC da regressão binomial logística de TEN_2D.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

O valor de AUC é de 0,75. Esse valor indica modelo com capacidade aceitável de discriminar o “Pass/Out”, conforme os limiares propostos por Hosmer e Lemeshow (2000). A

Tabela 3.15 apresenta os coeficientes obtidos na regressão.

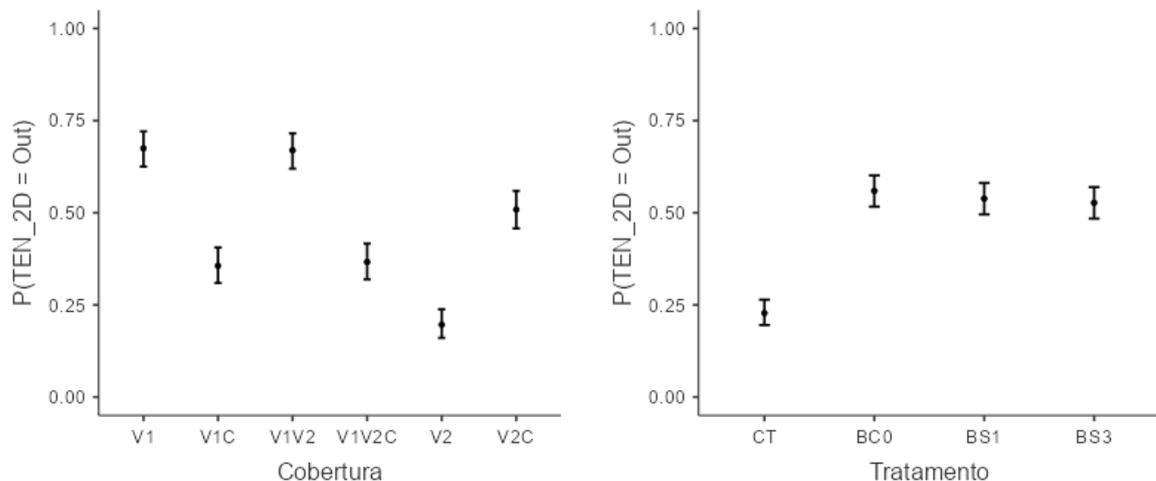
Tabela 3.15 - Coeficientes da regressão logística binomial da variável TEN_2D.

Preditor	Estimativa	SE	Z	p	Odds ratio	I.C. 95%	
						Inferior	Superior
Intercepto	-0.3109	0.136	-2.288	0.022	0.733	0.5614	0.956
Cobertura:							
V1C – V1	-1.3224	0.155	-8.537	< .001	0.266	0.1967	0.361
V1V2 – V1	-0.0245	0.157	-0.157	0.876	0.976	0.7179	1.326
V1V2C – V1	-1.2769	0.155	-8.263	< .001	0.279	0.206	0.378
V2 – V1	-2.1396	0.168	-12.731	< .001	0.118	0.0847	0.164
V2C – V1	-0.6953	0.153	-4.557	< .001	0.499	0.3699	0.673
Tratamento:							
BC0 – CT	1.4589	0.133	10.945	< .001	4.301	3.3124	5.586
BS1 – CT	1.3746	0.133	10.34	< .001	3.953	3.0466	5.13
BS3 – CT	1.3288	0.133	10.007	< .001	3.776	2.9111	4.899

Nota. As estimativas representam as chances (Odds) de "TEN_2D = Out" vs. "TEN_2D = Pass"
 Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A conversão das chances em probabilidades é apresentada em forma de gráfico, na Figura 3.28.

Figura 3.28- Probabilidade dos diferentes níveis de COBERTURA e TRATAMENTO apresentar tendência planimétrica.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Da regressão:

a) em relação ao TRATAMENTO CT, todos os outros tipos de tratamento apresentam chances significativamente maiores ($p < 0,05$) de gerar dados com tendência (BC0=4,3x mais chances, BS1=3,9x e BS3=3,7x); e

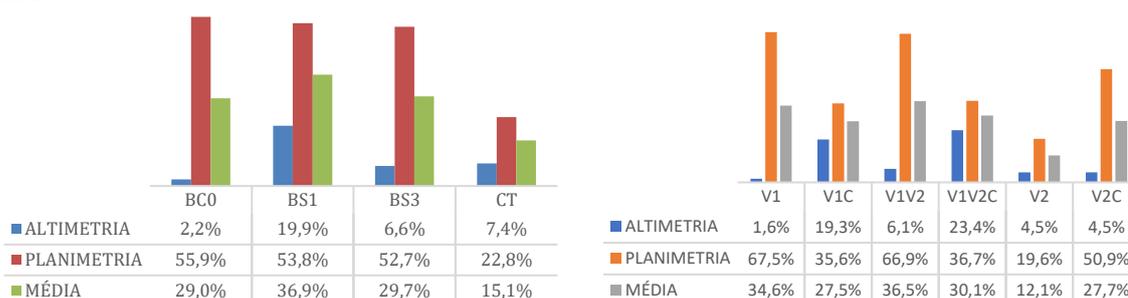
b) com relação a COBERTURA V1, a cobertura V1V2 tem chances iguais de obter dados tendencioso ($p \geq 0,05$), enquanto V2 apresenta $\sim 1/8x$ das chances de V1V2 (ou V1) em gerar dados com tendência planimétrica.

Reavaliando a regressão com o agrupamento das variáveis COBERTURA na COBERTURA_VOO, (VV1 agrupa V1 e V1C; VV1V2 agrupa V1V2 e V1V2C e VV2 agrupa V2 e V2C), o resultado aponta que VV1 e VV1V2 apresentam chances iguais, enquanto VV2 apresenta metade das chances de apresentar dados com tendência planimétrica.

3.3.5.6 Comparações das probabilidades de tendência planimétrica/altimétrica

Comparando os gráficos da Figura 3.29, das probabilidades de se encontrar erros sistemáticos altimétricas ou planimétricas nas amostras da pesquisa, percebe-se que a planimetria se mostra mais susceptível a apresentar tendência, com média de 46,2% de possibilidade entre os níveis de COBERTURA e 46,3% nos de TRATAMENTO — na altimetria os respectivos valores são 9,9% e 9,0%.

Figura 3.29- Probabilidades dos níveis de COBERTURA e TRATAMENTO em ter tendência na planimetria ou altimetria.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A avaliação indica que o TRATAMENTO-CT apresenta a menor média de probabilidades. Considerando:

a) TRATAMENTO-CT é o único grupo de análise que utiliza as posições com as qualidades de navegação nas fotos (NAV);

b) as precisões das coordenadas NAV têm valores superiores a 100x as dos outros grupos, que utilizam coordenadas GD-PPK;

c) os valores de precisão dos dados de entrada no MMC partiram das qualidades de entrada (NAV/PPK); e

d) os valores de entrada do MMC determinam a rigidez do algoritmo SfM em identificar pontos homólogos de amarração — com possibilidades de variar ao longo de uma grande amplitude posicional, o algoritmo tem uma folga maior para se ajustar e realizar as amarrações.

Pode-se presumir que a menor probabilidade de dados sem tendências no

TRATAMENTO CT se deve à maior amplitude de posições que o processo de identificação de pontos de amarração encontrou nesse grupo, uma vez que a precisão posicional (valor que o processo fotogramétrico tem livre para variar a posição da foto) no caso das câmeras com solução NAV é na faixa de 6 m, enquanto dos grupos com solução PPK é de 4 cm.

Entre as coberturas, V2 apresenta a menor média. Com relação à componente planimétrica, que apresenta a maior concentração de tendência, destaca-se:

a) COBERTURA V2 é a única com menos de 20% de probabilidade de apresentar tendência planimétrica;

b) os dados das coberturas V2 e V2C (COBERTURA_VOO VV2) são as únicas que utilizam todas as coordenadas das marcações de solo e fotos de voo realizadas a partir de uma mesma base local (RN07);

c) os dados das COBERTURAS_VOO VV1 e VV1V2 utilizam coordenadas das marcações de solo realizadas a partir de 3 diferentes bases locais (RN00, RN03 e RN07) e coordenadas das fotos de voo referenciadas à RN03;

d) as relações de probabilidade de tendência entre as geometrias de 3 faixas (3F) com relação às de faixa única central (FC), ou seja, V1 em relação a V1C; V2 em relação a V2C e V1V2 em relação a V1V2C; apontam que somente na comparação do conjunto V2/V2C, a geometria 3F tem menores probabilidades de apresentar tendências.

e) o posicionamento planimétrico original das bases utilizadas na pesquisa (RN00, RN03 e RN07) teve que ser reprocessado, pois a documentação dos pontos não apresentava os valores de precisão associada e a solução fotogramétrica com tais dados originais apresentou erros incompatíveis com o processo;

f) o método utilizado para a correção das coordenadas das bases (sessão única de posicionamento estático rápido em relação a uma única estação RBMC) se mostrou eficiente para solucionar o problema de qualidade posicional dos marcos, gerando soluções de linha de base com poucos milímetros de erro, mas não permitiu o ajustamento das coordenadas entre os eles, já que não havia redundância de informações.

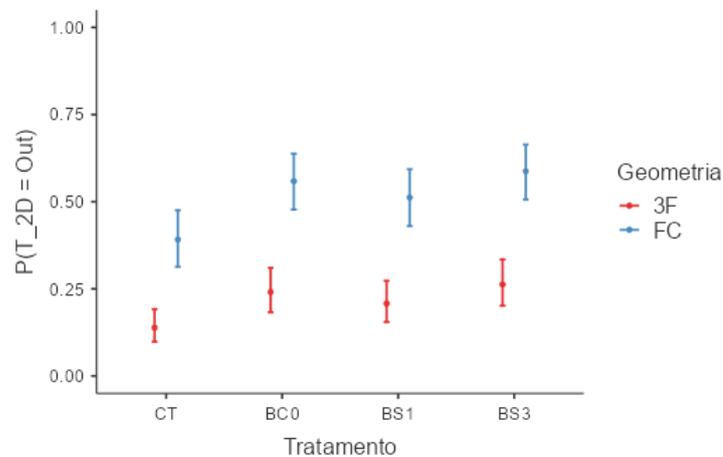
A partir desse conjunto de dados, infere-se que a maior concentração de dados com tendência planimétrica nas coberturas de voo VV1 e VV1V2 reflete a falta de ajustamento entre as coordenadas das bases utilizadas como referência. Para a relação de probabilidades 3F/FC na cobertura de voo VV2 (única em que a geometria 3F apresenta menor probabilidade), infere-se que essa seria a relação nas outras coberturas, caso as bases tivessem sido ajustadas.

A Figura 3.30 apresenta o gráfico de probabilidades de tendência planimétrica, obtido pela regressão logística binomial de TEN_2D com relação aos níveis de

TRATAMENTO e de geometria da coleta, considerando somente a cobertura de voo VV2.

O modelo de regressão com os dados somente da cobertura de voo VV2 apresenta um bom ajuste geral aos dados de entrada (Omnibus $p < 0.001$); com a indicação que as variáveis independentes (TRATAMENTO e Geometria) influenciam significativamente na variação da variável dependente (TEN_2D); com pseudo R^2 (Nagelderke) de 0,15; capacidade de predição com 70% de acurácia e AUC de 0.7: capacidade aceitável de discriminar os níveis “Pass/Out”.

Figura 3.30- Probabilidade dos diferentes níveis de TRATAMENTO apresentar tendência planimétrica, considerando somente a cobertura de voo VV2 (que agrega tanto a COBERTURA V2 quanto a V2C).



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Nessa situação, o nível CT de TRATAMENTO continua sendo o que apresenta a menor probabilidade de apresentar dados com tendências planimétricas, sendo que os tratamentos “BC0”, “BS1” e “BS3” apresentam respectivamente 2,21x; 1,97x e 1,63x mais chances em relação a “CT” de apresentarem dados tendenciosos na planimetria.

Aos resultados altimétricos não são feitas inferências, pois neste estudo não se implementou nenhuma sistemática capaz de aferir a qualidade altimétrica das bases, tampouco os relatórios de determinação de suas cotas apresentam suas qualidades/confiabilidades individualizadas.

3.3.5.7 Amostras sem tendências — seja planimétrica ou altimétrica

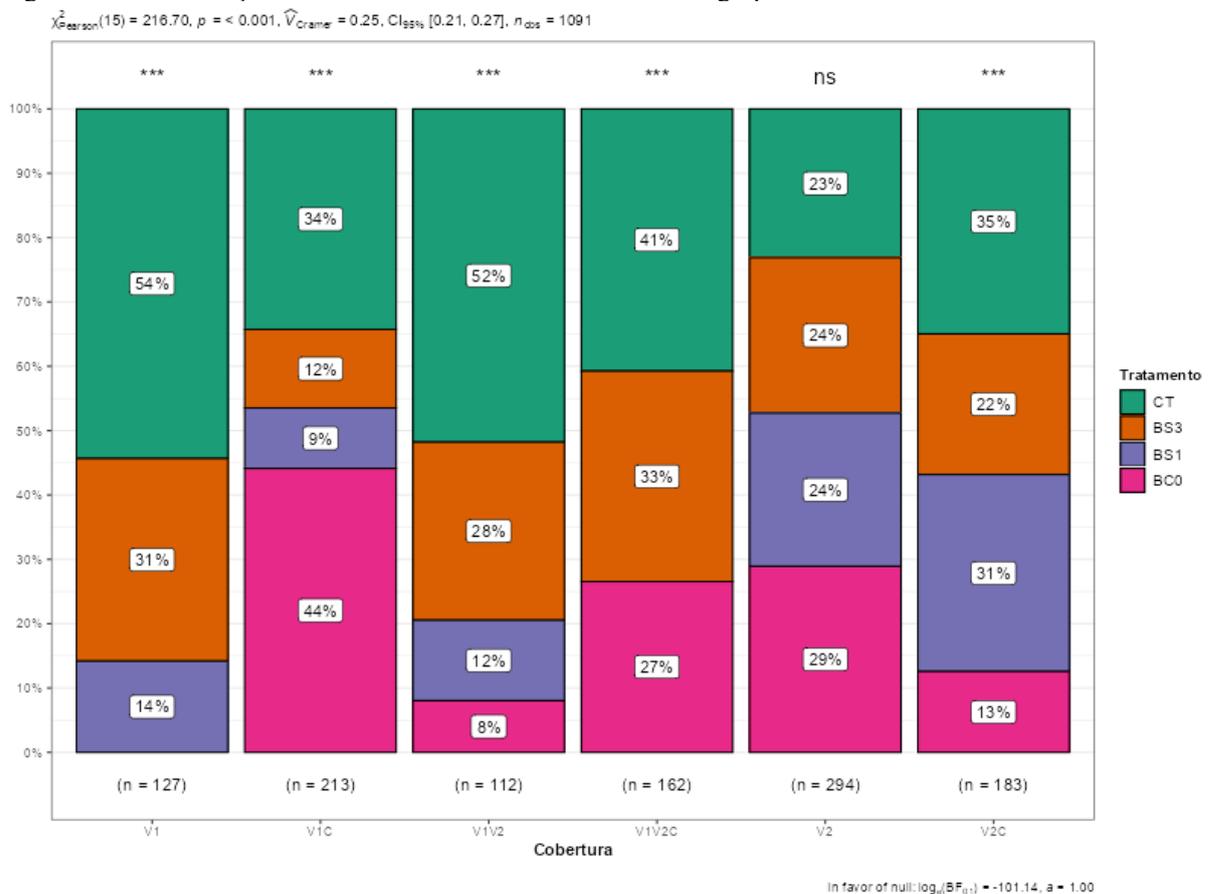
Para atender aos requisitos de avaliação sugeridos no PAP-PCD (EB-2016), foi tabulada a variável dicotômica TENDÊNCIA (Pass/Out) para armazenar as amostras com relação a presença de tendência em alguma componente — seja planimétrica ou altimétrica. O nível “Pass” agrega as amostras sem tendência (TEN_2D = “Pass” e TEN_Z_bin = “Pass”) e o “Out” os que apresentam tendência em alguma das componentes.

Das 2400 amostras da pesquisa, 1280 (53,3%) não apresentam tendência planimétrica (TEN_2D = “Pass”) e 2115 (88,15%) não apresentam tendência altimétrica (TEN_Z_bin = “Pass”).

A combinação dos dados sem tendência aponta que 1.091 (45,46%) amostras da pesquisa são livres de tendência planimétrica ou altimétrica (TENDÊNCIA = “Pass”).

A distribuição percentual dos 1091 de elementos TENDÊNCIA = Pass, por grupo de análise (COBERTURA e TRATAMENTO) é apresentada na Figura 3.31.

Figura 3.31- Distribuição dos elementos TENDÊNCIA = Pass nos grupos de análise.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Percebe-se que a COBERTURA V2 é a única que apresenta elementos distribuídos em todos os níveis de TRATAMENTO. De tal sorte que o teste qui-quadrado de Pearson da distribuição não foi significativo — indicando que nessa cobertura os níveis de TRATAMENTO podem ser considerados igualmente distribuídos.

3.3.6 Medida de avaliação posicional absoluta

Avaliam-se os processos aerofotogramétricos quanto à qualidade planimétrica e

altimétrica, pelas variáveis RMSE_2D e RMSE_Z, respectivamente. Os valores são formados a partir da média e do desvio padrão dos conjuntos de divergências planimétricas (RMSE_2D) e altimétricas (RMSE_Z) das amostras dos grupos de análise, conforme a expressão

$$RMSE_{(aval)} = \sqrt{(\bar{x})^2_{(aval)} + (\sigma)^2_{(aval)}} \quad (7)$$

Onde $_{(aval)}$ indica a componente avaliada (2D - planimétrica, Z - altimétrica); \bar{x} é a média de divergências da amostra avaliada na componente e σ o respectivo desvio padrão.

A Figura 3.32 apresenta a distribuição dos valores de RMSE_2D e RMSE_Z, agrupados pelo resultado de TENDÊNCIA.

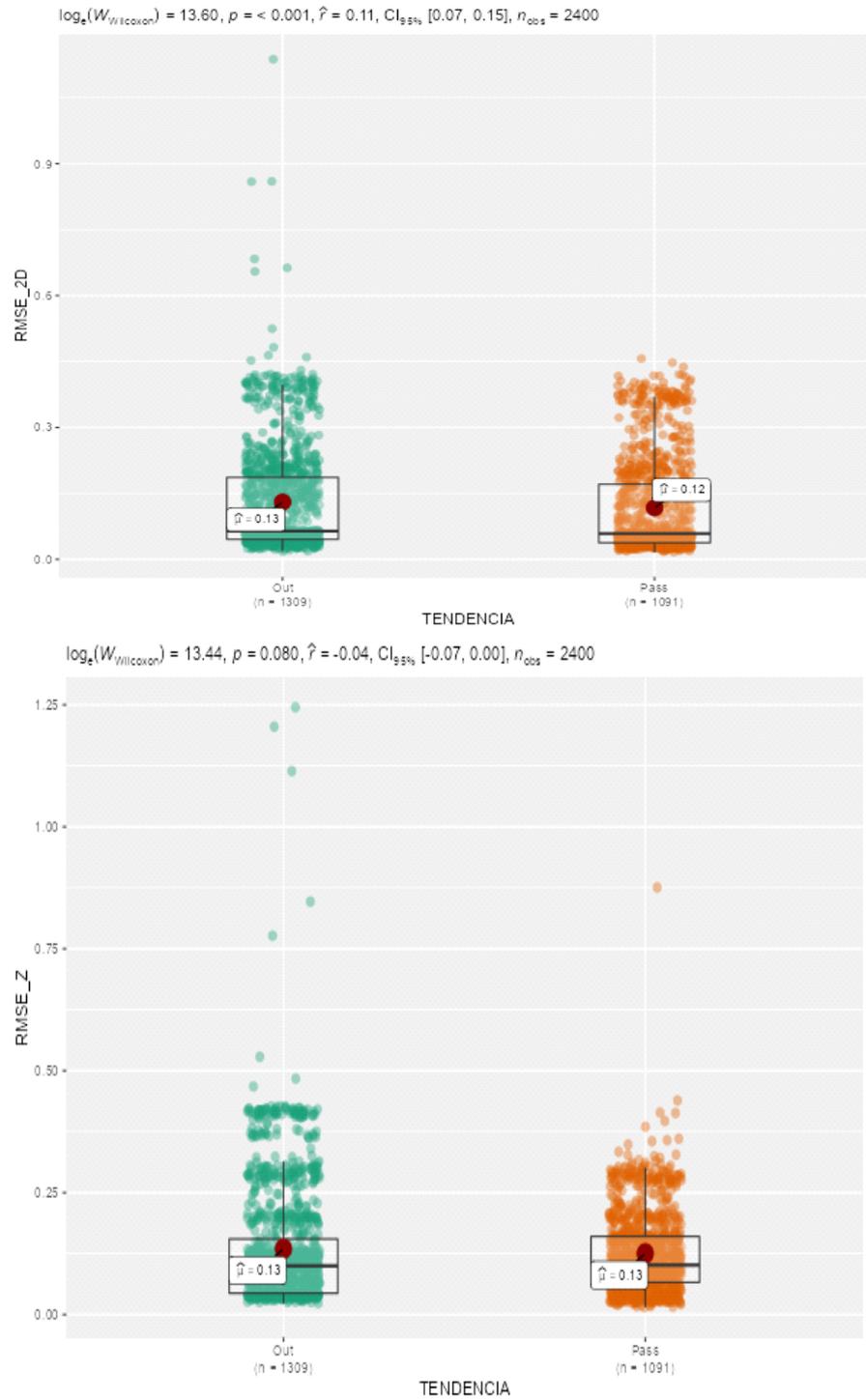
O teste não paramétrico de Mann-Whitney (também conhecido como teste de soma de postos de Wilcoxon ou teste Wilcoxon de duas amostras) aponta que as diferenças de RMSE_2D entre os níveis de TENDÊNCIA são estatisticamente diferentes ($p < 0,001$), enquanto as de RMSE_Z podem ser consideradas sem variação estatisticamente significativa ($p > 0,05$).

O teste Mann-Whitney é uma alternativa não paramétrica ao teste t de duas amostras não pareado, utilizado para comparar dois grupos independentes de amostras. Aplica-se Mann-Whitney quando os dados não apresentam distribuição gaussiana (normal), como no caso da presente pesquisa.

A Figura 3.33 apresenta a distribuição de RMSE_2D, dividido por TENDÊNCIA, ao longo dos níveis de COBERTURA.

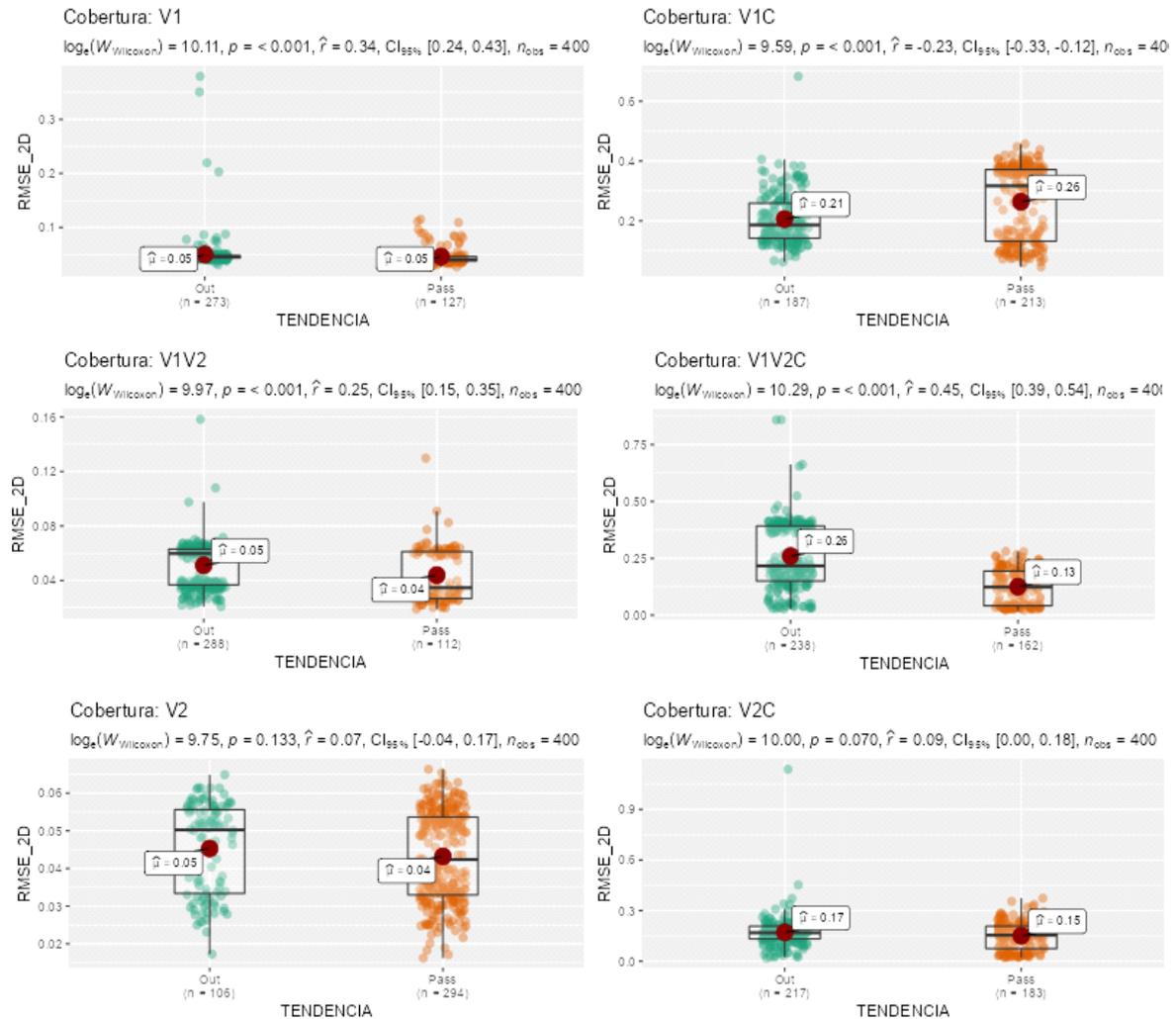
O teste de Mann-Whitney aponta que somente COBERTURA V2 e COBERTURA V2C não apresentam diferenças significativas entre as opções de TENDÊNCIA nos valores RMSE_2D. Esse resultado reforça a inferência de que os resultados sofrem influência da falta de ajustamento planimétrico entre as coordenadas das bases RN00, RN03 e RN07 (utilizadas como referência nas coletas de dados para as coberturas V1, V1V2, V1C e V1V2C). Ressaltando que as coberturas V2 e V2C tiveram todo o levantamento de dados apoiado em uma única base de referência (RN07).

Figura 3.32- Distribuição dos valores de RMSE_2D e RMSE_Z, agrupados pelo resultado de TENDÊNCIA



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 3.33- Distribuição dos valores de RMSE_2D e RMSE_Z, agrupados pelo resultado de TENDÊNCIA.

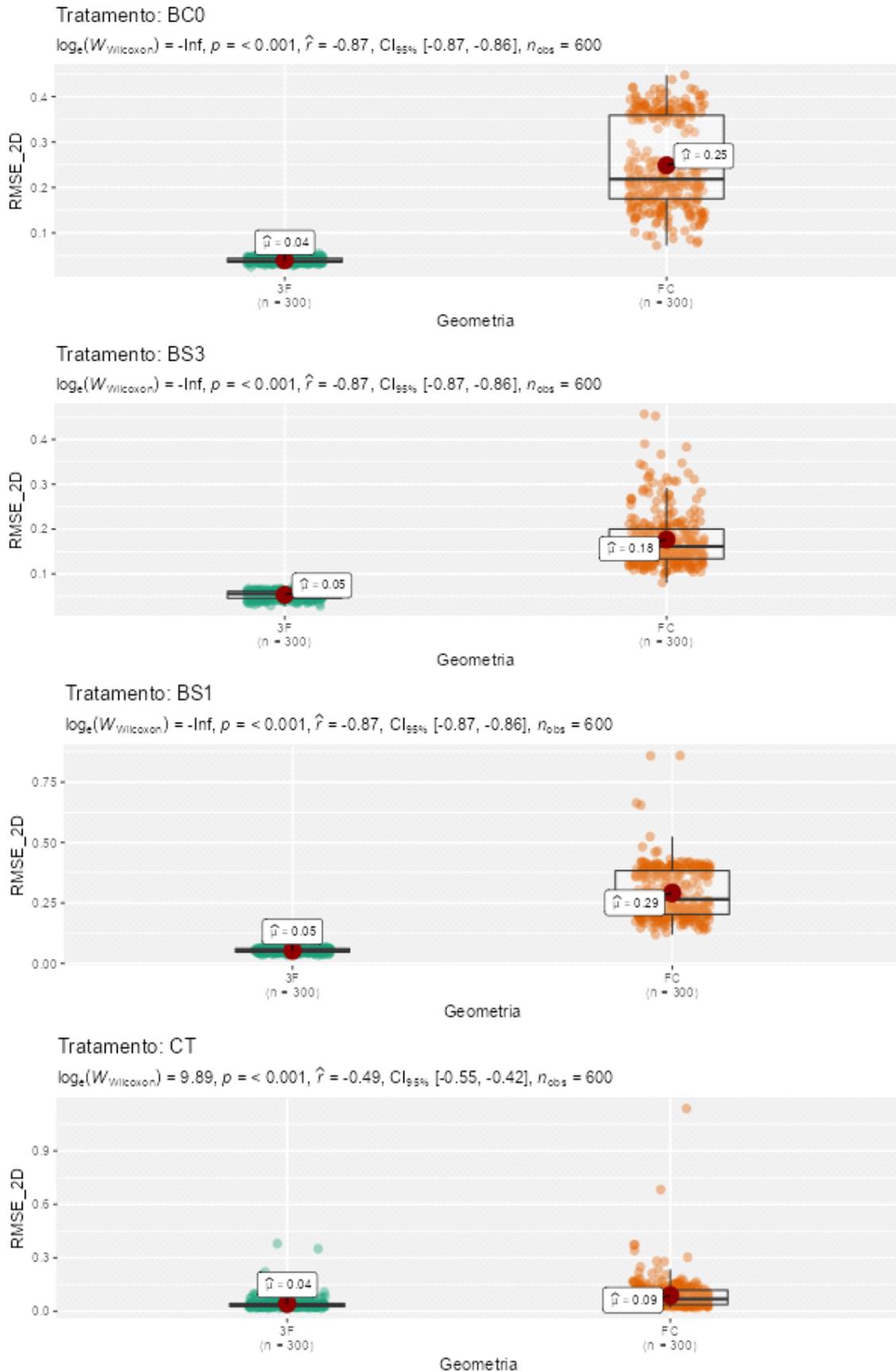


Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Da análise dos gráficos, percebe-se que as coberturas V1, V2 e V1V2 (com geometria de coleta com 3 faixas - 3F), apresentaram resultados mais precisos do que as coberturas V1C, V2C e V1V2C (de coleta por faixa única central - FC).

A Figura 3.34 apresenta a distribuição dos valores de RMSE_2D dividido pelo tipo de geometria de coleta ao longo dos níveis de TRATAMENTO.

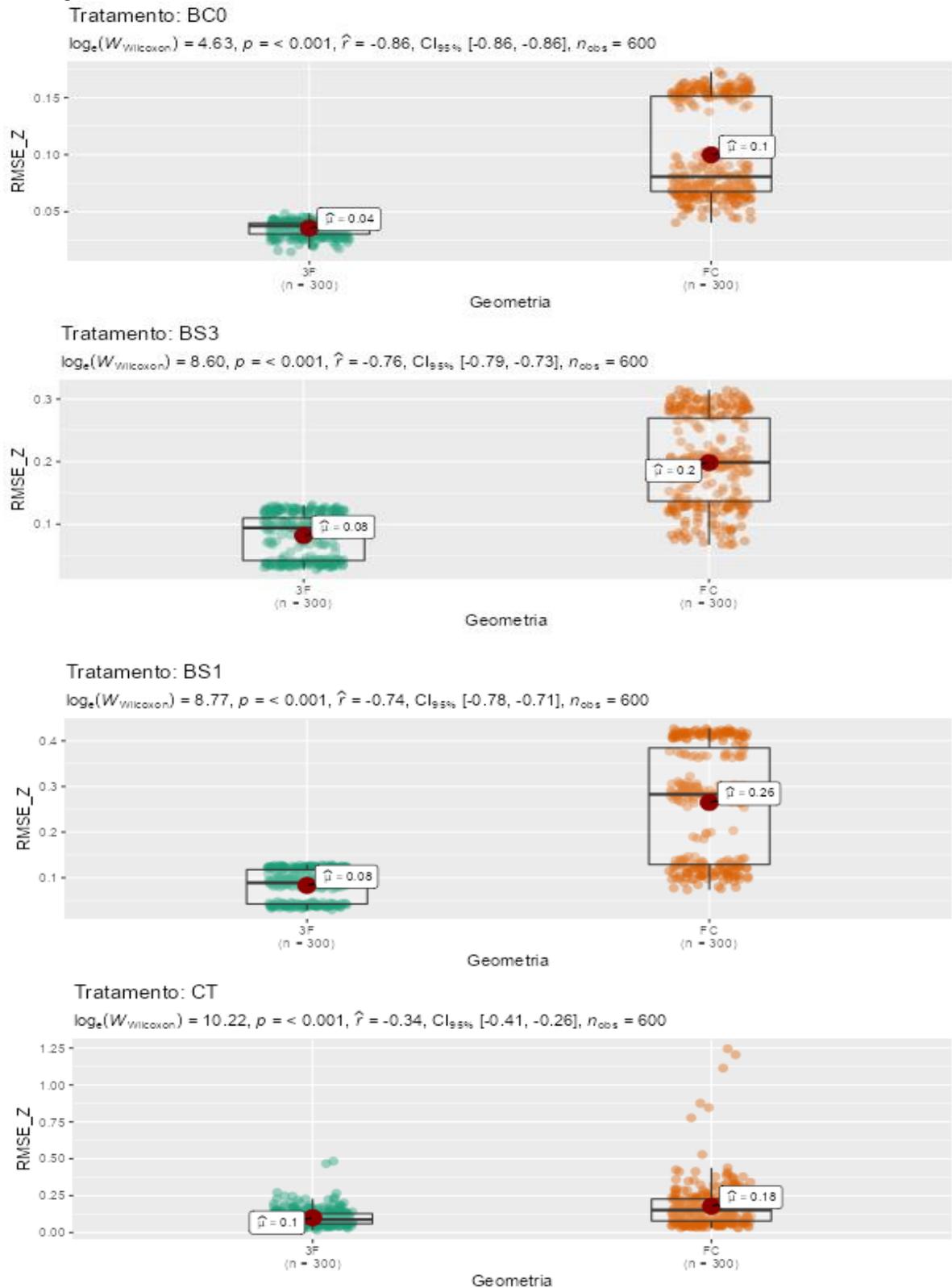
Figura 3.34- Valores de RMSE_2D agrupado pela geometria de coleta (3F – 3 Faixas; FC – Faixa única central) ao longo dos níveis de TRATAMENTO.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A Figura 3.35 apresenta a distribuição dos valores de RMSE_Z dividido pelo tipo de geometria de coleta ao longo dos níveis de TRATAMENTO.

Figura 3.35- Valores de RMSE_Z agrupados pela geometria de coleta (3F – 3 Faixas; FC – Faixa única central) ao longo dos níveis de TRATAMENTO.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

O teste de Mann-Whitney aponta que em todos os conjuntos avaliados a diferença entre os valores de RMSE_2D e RMSE_Z é significativamente diferente nas geometrias de coleta de três faixas (3F) e faixa única central (FC).

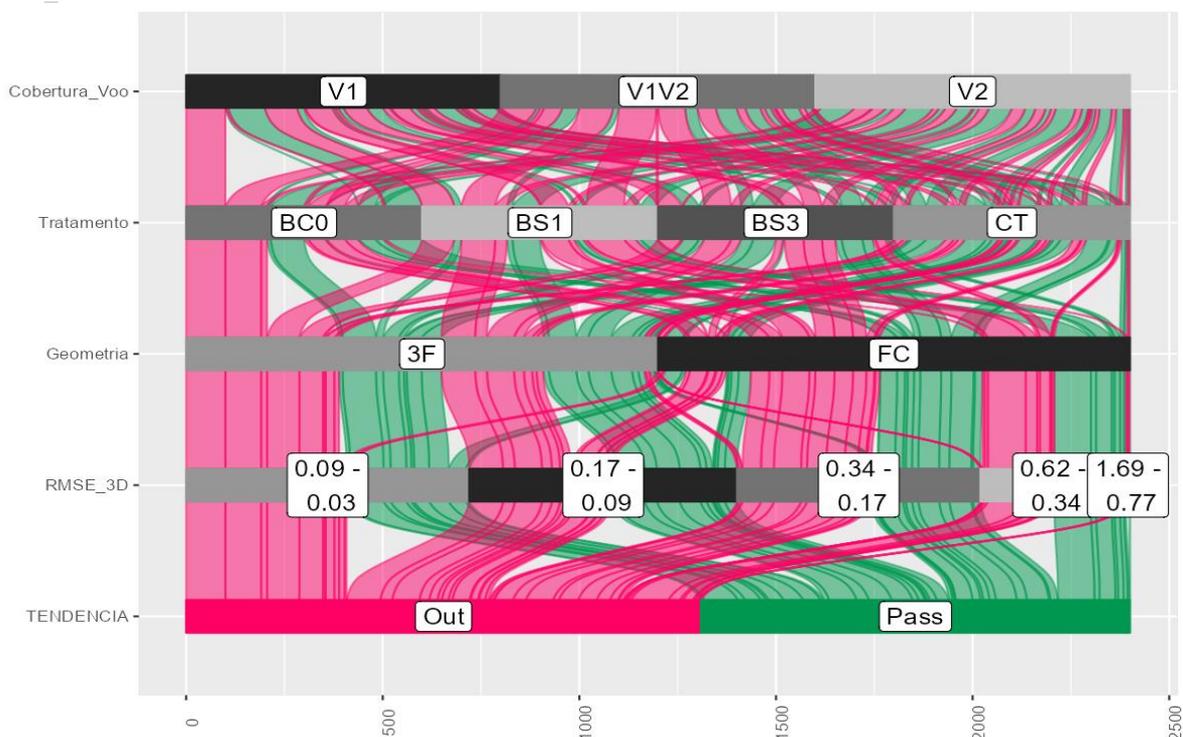
A análise dos gráficos permite afirmar que TRATAMENTO CT é o que apresenta a menor diferença planimétrica, com o valor médio de RMSE_2D variando 5 cm entre 3F e FC — valor significativamente menor que o de TRATAMENTO BS3, o segundo colocado, com média de RMSE_2D variando 13 cm. Na avaliação altimétrica, o TRATAMENTO BS0 é o que apresenta a menor diferença de RMSE_Z entre 3F e CT, com média de 6 cm, sendo seguido pelo TRATAMENTO CT, com 8 cm de média.

A variável RMSE_3D representa a dispersão média tridimensional e foi calculada pela raiz quadrada da soma do quadrado de RMSE_2D com o quadrado de RMSE_Z

$$RMSE_{3D} = \sqrt{(RMSE_{2D})^2 + (RMSE_Z)^2} \quad (8)$$

A Figura 3.36 apresenta o diagrama aluvial, também conhecido como diagrama de Sankey, que representa os fluxos das amostras da pesquisa entre as variáveis dos Tratamentos, Cobertura de Voo, Geometria de coleta, RMSE_3D e TENDÊNCIA — destacando por cores os seus dois níveis (Pass / Out).

Figura 3.36- Diagrama aluvial dos fluxos entre TRATAMENTO, COBERTURA, TENDÊNCIA, GEOMETRIA e RMSE_3D.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

No diagrama aluvial, a largura das faixas indica grupos de amostras que seguem um mesmo padrão de relação entre as variáveis observadas — no caso da pesquisa, as 2400 amostras foram agrupadas em 97 faixas de fluxo.

A observação do diagrama da pesquisa permite, por exemplo, perceber que somente um grupo de poucas amostras foi capaz de não apresentar tendência tendo valores altos de dispersão tridimensional — todos do grupo de análise V2C-CT. Que TRATAMENTO CT é o que apresenta a maior segmentação de faixas da análise, indicando grande variedade de combinações para esse tipo de tratamento ou, ainda, que são poucas as amostras obtidas por geometria de coleta por faixa única central (FC) que estão na faixa dos menores valores de RMSE_3D.

3.3.6.1 Classificação em padrão cartográfico

Para determinar a classificação de um produto em um padrão cartográfico, é necessário verificar se as discrepâncias planimétricas e/ou altimétricas absolutas encontradas nos produtos atendem às condições impostas pelo padrão nas classes e escalas investigadas.

O principal regulamento da cartografia nacional brasileira é o Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984, que estabelece as “Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional”. Nele encontram-se os valores das tolerâncias estabelecidas pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), estabelecendo limites de dispersão pontual para as avaliações e dividindo os produtos, de acordo com as escalas, em classes (A, B ou C) — sendo a classe A, a mais exigente.

A norma regulamenta que 90% dos pontos medidos em campo ou em produto cartográfico de melhor qualidade, para que possam se enquadrar em uma determinada classe, deverá ter a discrepância menor que a medida do PEC. E a dispersão do conjunto de pontos não deverá ser maior que o Erro Padrão (EP) considerado, sendo “equivalentes as expressões Erro- Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio Quadrático” (BRASIL, 1984), em que o valor do PEC corresponde a 1,6449 vezes o valor de EP.

Baseado no marco legal do Decreto nº 89.817 (BRASIL, 1984), há duas implementações do Exército Brasileiro (EB) que apresentam releituras do PEC:

a) a Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais, ET-ADGV (EB; 2011) apresenta o padrão de exatidão cartográfico dos produtos cartográficos digitais (PEC-PCD), que institui classes A, B, C e D; onde as classes B, C, e D têm os mesmos

parâmetros das classes A, B e C do PEC (BRASIL, 1984) e a nova classe A passa a ser mais rigorosa; e

b) a Norma da Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (EB, 2016) apresenta o Padrão de Acurácia Posicional para Produtos Cartográficos Digitais (PAP-PCD), com utilização das mesmas classes do PEC-PCD e atualizações de termos e conceitos utilizados no Decreto 89.817 (BRASIL, 1984): o termo “valor do PEC” é substituído para o de “valor do Erro Máximo (EM) da amostra”; o Erro Padrão (EP) considerado passa a ser explicitamente o RMS (em notação internacional: RMSE) e a noção de “exatidão” é substituída pela de “acurácia” — considerando que “entende-se que a acurácia envolve tanto a precisão (efeitos aleatórios) e a tendência (efeitos sistemáticos)” (SANTOS, 2016, p.640). O texto da norma ressalta que “utiliza o mesmo procedimento de cálculo previsto na legislação (BRASIL, 1984), apenas atualiza os valores de EM e EP para alguns tipos de produtos” (EB, 2016. p. 3-21).

Na pesquisa foram adotados os valores e nomenclaturas do PAP-PCD (EB, 2016).

A Tabela 3.16 apresenta a forma de cálculo do erro padrão (EP/RMSE) e do valor de referência (EM/PEC) para planimetria e altimetria.

Tabela 3.16 - Valores referência das classes/escalas do PEC, PEC-PCD e PAP-PCD.

AValiação PLANIMÉTRICA (Denominador escala avaliada= E)			
PEC	PAP – PCD	EM _(PEC) ou PEC _(PAP-PCD) (m)	EP _(PEC) ou RMSE _(PAP_PCD) (m)
-	A	1,6449 x RMSE	0,17mm x E
A	B	1,6449 x RMSE	0,3 mm x E
B	C	1,6449 x RMSE	0,5 mm x E
C	D	1,6449 x RMSE	0,6 mm x E
AValiação ALTIMÉTRICA (Equidistância da curva de nível avaliada = H)			
PEC	PAP – PCD	EM _(PEC) ou PEC _(PAP-PCD) (m)	EP _(PEC) ou RMSE _(PAP_PCD) (m)
-	A	1,6449 x RMSE	1/6 x H
A	B	1,6449 x RMSE	1/3 x H
B	C	1,6449 x RMSE	2/5 x H
C	D	1,6449 x RMSE	1/2 x H

Fonte: adaptada de ET-ADGV (EB, 2011).

Para auxiliar a classificação dos pontos de checagem dos alinhamentos das amostras desta pesquisa, foi implementada uma rotina computacional que compara as posições dos pontos homólogos e verifica os valores de suas discrepâncias de acordo com os parâmetros estabelecidos no PAP-PCD.

Para validar os resultados da rotina foi verificada uma amostra aleatória de 30 amostras com uso do programa GeoPEC v.3.5.2 (2019), um “programa científico [...] voltado para avaliação da Acurácia Posicional em dados espaciais [...] em relação a três normas: (i)

Decreto nº. 89.817 de 1984, em sua implementação da ET-CQDG; (ii) Inspeção Topográfica contida na NBR 13.133 de 1994 e (iii) Norma de Execução Incra/DF/02 de 2018” (SANTOS, 2018).

A comparação dos resultados obtidos na rotina com os do software GEOPEC demonstrou 100% de compatibilidade, com os dois resultados apresentando as mesmas classificações para as amostras avaliadas e as mesmas medidas de presença ou não de tendência e valores de RMSE.

A rotina avalia se os dados apresentam erros sistemáticos; se os resíduos das diferenças seguem um padrão Gaussiano (distribuição normal) e se os valores apresentam *outliers* — medidas estatisticamente discrepantes no conjunto avaliado, excluindo-os da análise.

Na pesquisa, foram avaliadas medidas de acurácia, uma vez que se utilizou somente as amostras com TENDÊNCIA = “Pass”, conforme preconiza o PAP-PCD. O conjunto é formado por 1091 amostras, distribuídas entre os grupos de análise conforme apresentado na Tabela 3.17.

Tabela 3.17 - Distribuição de elementos TENDÊNCIA = Pass.

Cobertura	Tratamento			
	BC0	BS1	BS3	CT
V1	0	18	40	69
V1C	94	20	26	73
V1V2	9	14	31	58
V1V2C	43	0	53	66
V2	85	70	71	68
V2C	23	56	40	64

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Destaca-se que os grupos V1-BC0 e V1V2C-BS1 não apresentaram amostras TENDÊNCIA=Pass. A sequência de avaliação foi feita de acordo com as indicações e normativas contidas em BRASIL (1984), EB (2011; 2016), Santos *et al.* (2016):

a) Planimetria:

1- 90% dos pontos de checagem do produto têm valores de variação planimétrica (distância geométrica bidimensional entre os pontos homólogos do modelo e do campo) iguais ou menores ao valor do EM/PEC; e

2- os valores de dispersão da variação planimétrica menores ou iguais ao valor de RMSE/EP de referência, em relação à escala e classe avaliadas.

b) Altimetria:

3- 90% dos pontos de checagem do produto têm valores de variação altimétrica (módulo da diferença no eixo Z entre pontos homólogos do modelo e do campo) iguais ou

menores ao valor do EM/PEC; e

4- os valores de dispersão da variação altimétrica menores ou iguais ao valor de RMSE/EP de referência, em relação à escala e classe avaliadas.

A rotina computacional permite testar a planimetria dos produtos em escalas com qualquer denominador inteiro, maior e diferente de zero; e altimetria com relação a curvas de nível de qualquer valor positivo maior e diferente de zero.

3.3.6.2 Classificação planimétrica das amostras

Os dados foram planimetricamente avaliados de acordo com as exigências das seguintes escalas e classes do PAP-PCD:

a) escala 1/2000, classe B (equivalente à classe A do PEC); condição verificada pela variável **B2000**, de dois níveis (KO e OK), sendo que “OK” indica adequação aos parâmetros da norma;

b) escala 1/2000, classe A; condição verificada pela variável **A2000**, de dois níveis (KO e OK), sendo que “OK” indica adequação aos parâmetros da norma;

c) escala 1/1000, classe A; condição pela variável **A1000**, de dois níveis (KO e OK), sendo que “OK” indica adequação aos parâmetros da norma; e

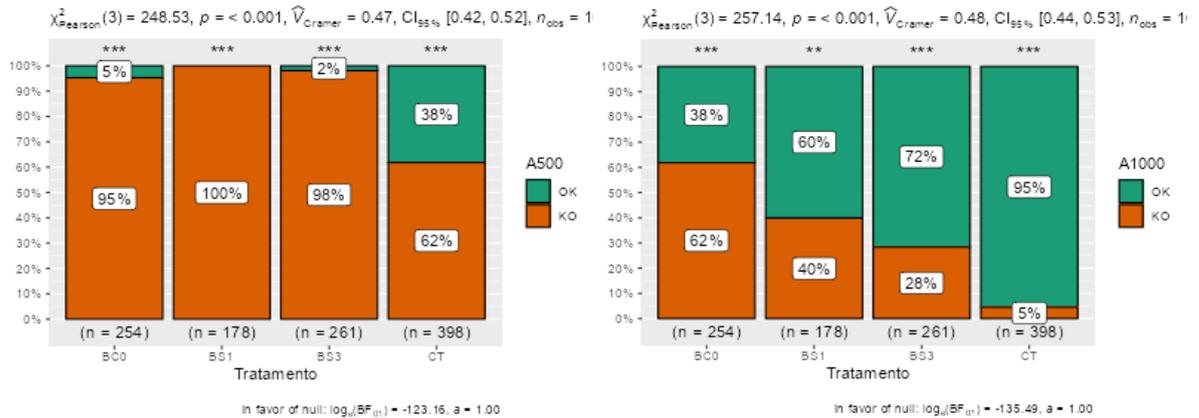
d) escala 1/500, classe A; condição pela variável **A500**, de dois níveis (KO e OK), sendo que “OK” indica adequação aos parâmetros da norma.⁷

Convém ressaltar que o plano de amostragem implantado foi planejado para distribuir os pontos de controle/checagem da pesquisa com a utilização do padrão de 10x10 cm, adequando a amostra para a escala 1/2000. Caso a amostragem considerada fosse baseada em células de 4x4 cm, a quantidade de pontos utilizados na pesquisa seria compatível com análise na escala 1/5.000

O resultado da avaliação aponta que todas as 1091 amostras investigadas (TENDÊNCIA = Pass) são planimetricamente compatíveis com as exigências das escalas 1/2000, uma vez que todos os valores de B2000 e A2000 são “OK”. A Figura 3.37 apresenta a distribuição de amostras pelos níveis de A1000 e A500.

⁷ A avaliação na escala 1/500 é uma extrapolação do plano amostral da pesquisa. A investigação nessa escala serve mais para avaliar as possibilidades dos produtos do que demonstrar efetiva compatibilidade.

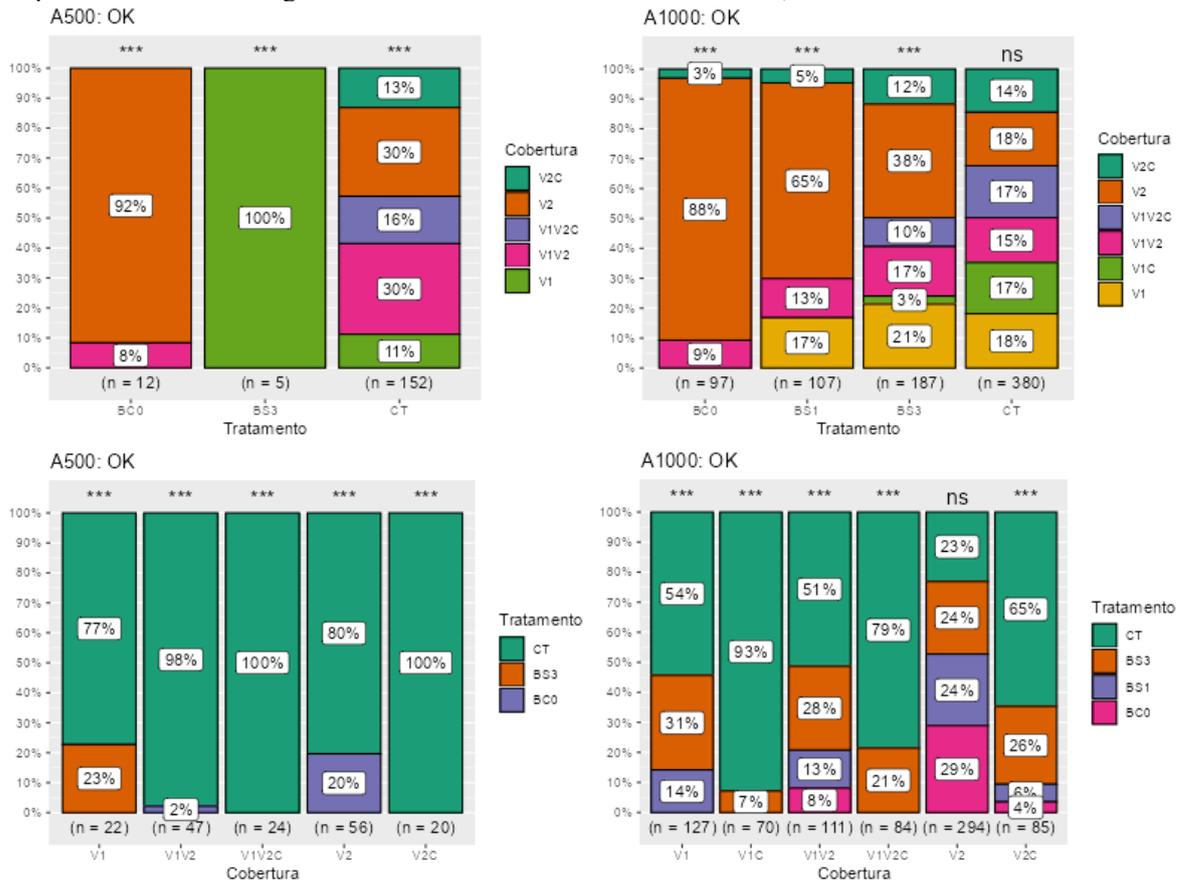
Figura 3.37- Resultados das avaliações de A1000 e A500



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Em valores gerais, 16% dos dados avaliados (TENDÊNCIA = Pass) apresentam A500=OK, enquanto 71% são A1000=OK. A Figura 3.38 apresenta a composição de dados “OK” nas variáveis A500 e A1000.

Figura 3.38- Composição de COBERTURA e TRATAMENTO das amostras aprovadas nas análises de compatibilidade com as exigências da classe A nas escalas 1/500 e 1/1000, de acordo com PAP-PCD.

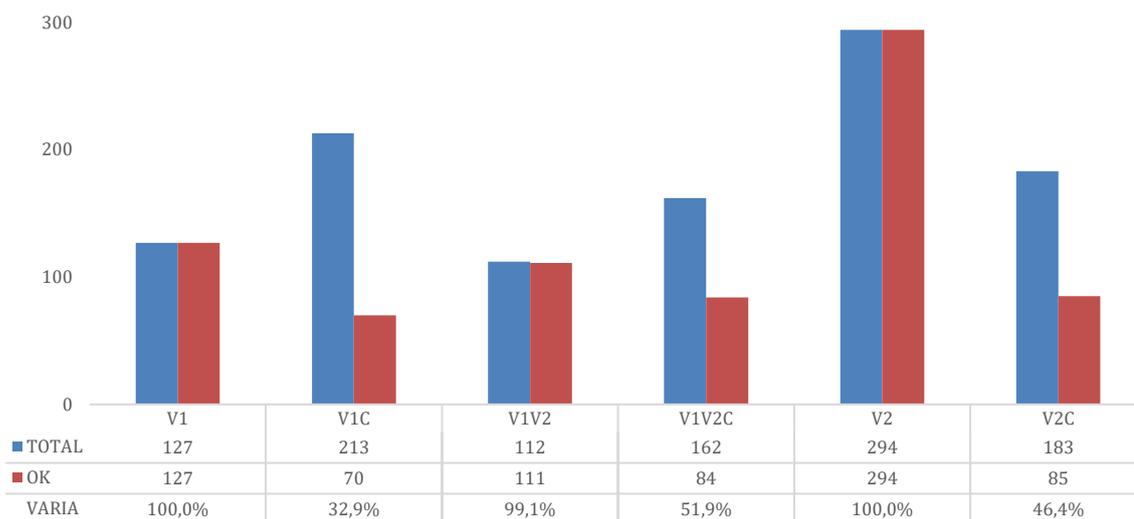


Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Na análise de elementos compatíveis com as exigências da classe A na escala 1/1000, de acordo com PAP-PCD (A1000 = OK), percebe-se que, via de regra, todos os

elementos das coberturas de geometria com três faixas (V1, V2 e V1V2) são “OK”, enquanto as de faixa única central (V1C, V2C e V1V2C) apresentam, na média, menos que 50% de compatibilidade, conforme apresentado na Figura 3.39.

Figura 3.39- Proporção entre coberturas coletadas por geometria de 3 faixas e de faixa única central de elementos compatíveis com a escala 1/1000 na classe A do PAP-PCD

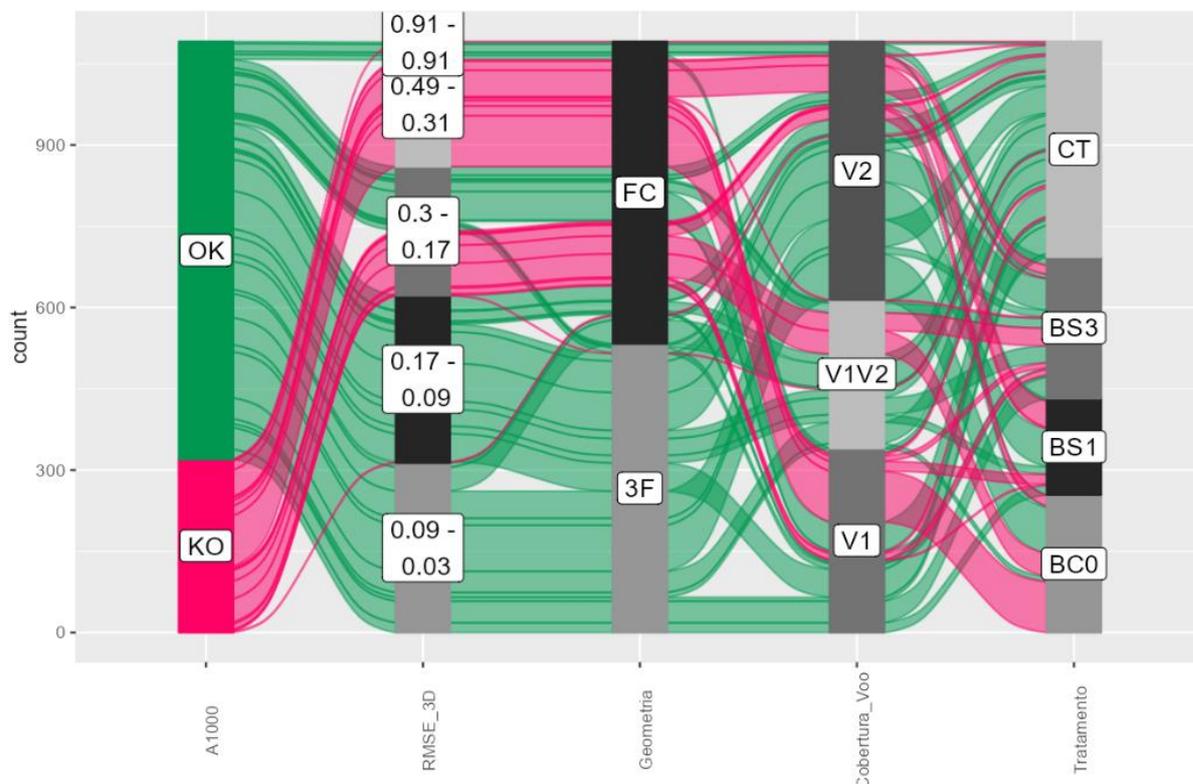


Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Na avaliação dos elementos compatíveis com as exigências da classe A na escala 1/500, de acordo com PAP-PCD (A500 = OK), destacam-se tanto o TRATAMENTO CT quanto a COBERTURA V2, por apresentarem as maiores concentrações de elementos. Também merece destaque a COBERTURA V1C e o TRATAMENTO BS1, por não apresentarem elementos compatíveis.

A Figura 3.40 demonstra o diagrama aluvial que relaciona as variáveis dos Tratamentos, Cobertura de Voo, Geometria de coleta, RMSE_3D com os resultados A1000 — destacando por cores os níveis de aprovação/reprovação (OK / KO).

Figura 3.40- Diagrama aluvial da relação de TRATAMENTO, COBERTURA, RMSE_3D com os níveis da variável A1000, representante da análise de compatibilidade com as exigências de classe A do PAP-PCD na escala 1/1000.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

3.3.6.3 Classificação altimétrica das amostras

A avaliação altimétrica das amostras foi feita com relação à capacidade dos dados em gerar curvas de nível (CN) com equidistância de:

a) um metro (1,0 m) e compatibilidade com as exigências da classe B no PAP-PCD (equivalente à classe A no PEC) — condição verificada na variável **CN10B**, de dois níveis (KO e OK), sendo que “OK” indica adequação aos parâmetros da norma; e

b) um metro (1,0 m) e compatibilidade com as exigências da classe A no PAP-PCD — condição verificada na variável **CN10A**, de dois níveis (KO e OK), sendo que “OK” indica adequação aos parâmetros da norma; e

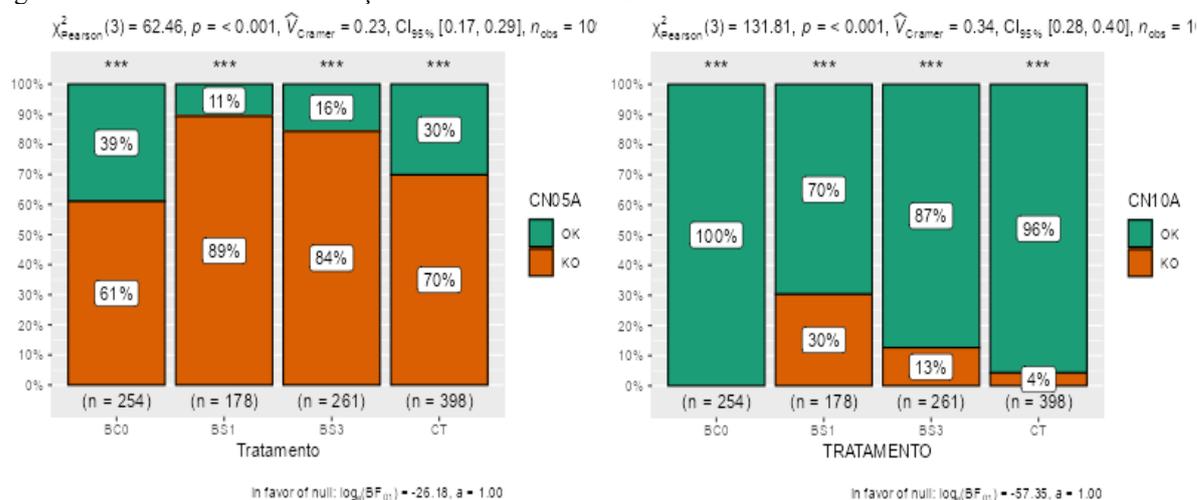
c) meio metro (0,5 m) e compatibilidade com as exigências da classe A no PAP-PCD; condição verificada na variável **CN05A**, de dois níveis (KO e OK), sendo que “OK” indica adequação aos parâmetros da norma.⁸

Os resultados apontam que não há diferenças entre a avaliação CN10A e CN10B.

⁸ A avaliação altimétrica nesse nível também pode ser considerada uma extrapolação do plano amostral da pesquisa, assim como foi no caso da análise na escala 1/500. A investigação serve mais para avaliar as possibilidades dos produtos do que demonstrar efetiva compatibilidade.

A pesquisa, então, adota os resultados da CN10A. A Figura 3.41 apresenta a distribuição de amostras pelos níveis de CN05A e CN10A.

Figura 3.41- Resultados das avaliações de C005A e CN10A.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

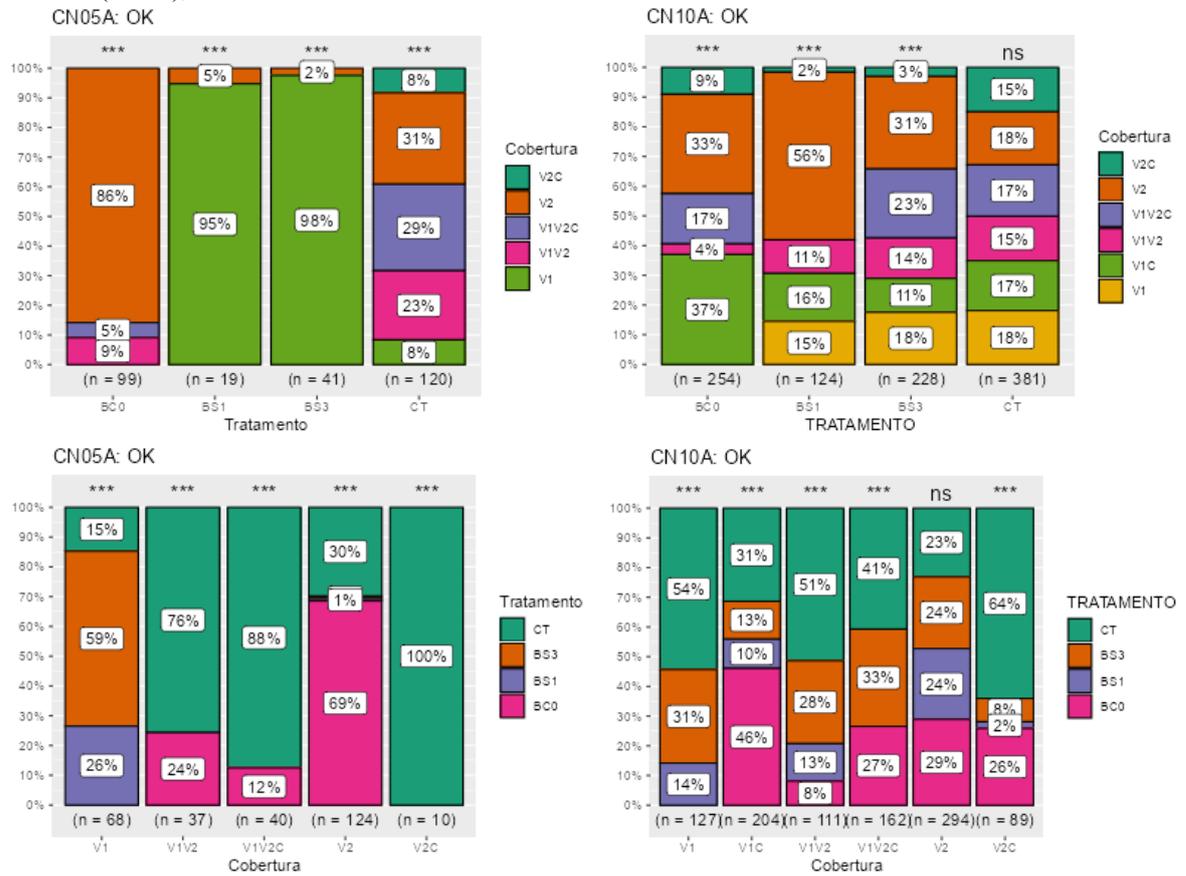
Em valores gerais, 26% dos dados avaliados (TENDÊNCIA = Pass) apresentaram CN05A = OK, enquanto 91% são CN10A = OK. Os níveis de TRATAMENTO BC0 e CT destacaram-se por apresentar as maiores quantidades de elementos compatíveis nas duas análises. A Figura 3.42 traz a composição de dados “OK” nas variáveis CN05A e CN10A.

A Figura 3.43 apresenta o diagrama aluvial que relaciona as variáveis dos Tratamentos, Cobertura de Voo, Geometria de coleta, RMSE_3D com os resultados CN10A — destacando por cores os níveis de aprovação/reprovação (OK / KO).

Do diagrama aluvial, destaca-se o TRATAMENTO BC0, que apresenta todas as amostras compatíveis com a avaliação. Interessante notar que, mesmo desconsiderando a avaliação de tendência (TENDÊNCIA = PASS), todos os dados BC0 se mostram adequados às exigências altimétricas (CN10A = OK).

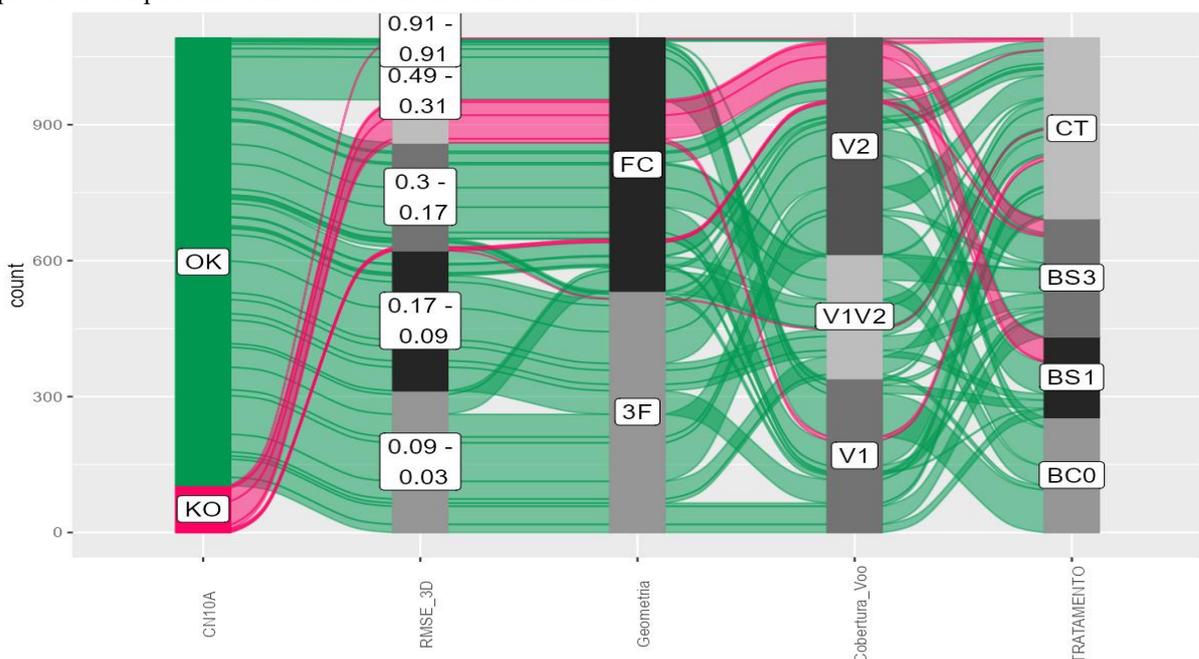
Convém lembrar, todavia, que os dados BC0 foram os que mais necessitaram da translação pela média altimétrica das divergências nos pontos de checagem (TESTE_Z = STT), para que a tendência altimétrica fosse eliminada.

Figura 3.42- Composição de COBERTURA e TRATAMENTO das amostras aprovadas nas análises de compatibilidade com as exigências da classe A para curvas de nível com equidistâncias de meio metro (CN05) e um metro (CN10), de acordo com PAP-PCD.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 3.43- Diagrama aluvial da relação de TRATAMENTO, COBERTURA, RMSE_3D com os níveis da variável CN10A, representante da análise de compatibilidade com as exigências de classe A do PAP-PCD para produtos compatíveis com curvas de nível de metro em metro.

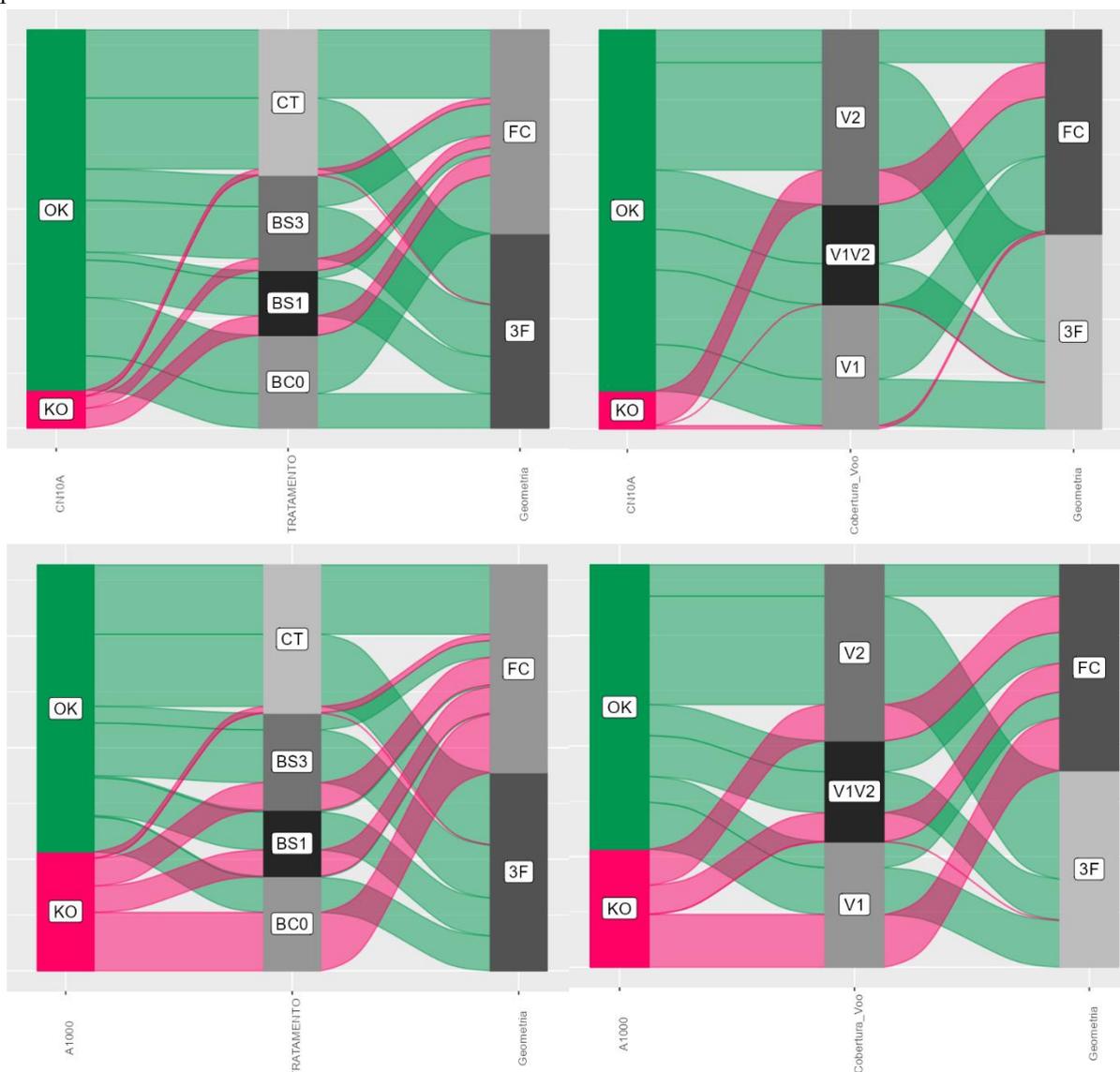


Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

No caso da geometria de coleta em faixa única central (FC), aquela que apresenta a melhor relação de fotos coletadas por área de cobertura, a pesquisa aponta que tanto para a planimetria (considerando A1000 = OK) quanto para a altimetria (considerando CN10A = OK), o tratamento CT se mostra o mais apropriado.

A Figura 3.44 apresenta os diagramas aluviais das relações entre A1000 e CN10A (OK/KO) com os níveis de TRATAMENTO (CT/BS3/BS1/BC0) e de geometria de coleta (FC/3F).

Figura 3.44- Diagrama aluvial da relação de TRATAMENTO e Geometria de coleta com os níveis das variáveis CN10A e A1000, respectivamente, representantes da análise de compatibilidade com as exigências de classe A do PAP-PCD para produtos altimetricamente compatíveis com curvas de nível de metro em metro e planimetricamente com a escala 1/1000.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

3.4 Conclusões

Neste capítulo, foram avaliadas as qualidades da aerotriangulação de fotos obtidas em coletas ARP com geometria de corredor e uso de georreferenciamento direto por pós-processamento cinemático (GD-PPK). Foram quantificadas e qualificadas as diferenças entre grupos de análise, indicando quais têm possibilidade de gerar produtos decorrentes apropriados ao uso em projetos rodoviários de acordo com normas cartográficas.

Os grupos representam variações de coletas aerofotogramétricas, com duas variáveis: COBERTURA, de seis níveis que representam os arranjos geométricos e recobrimentos dos voos das coletas (V1, V1C, V2, V2C, V1V2 e V1V2C), e TRATAMENTO, com quatro níveis que apontaram os métodos de controle no processamento (uso de pontos de controle e/ou georreferenciamento direto — CT, BC0, BS1 e BS3).

As análises foram feitas em conjunto de 2400 amostras obtidas por meio do Método de Monte Carlo a partir de uma única cobertura aerofotogramétrica de trecho rodoviário com cerca de 6 km de extensão, realizada por dois voos de coleta, V1 e V2.

A regressão logística binomial da presença/ausência de tendência apontou que, em relação a CT (processamento das fotos com as posições sem GD-PPK e utilização de pontos de controle ao longo do trecho), todos os outros tipos de tratamento apresentaram maiores chances de gerar dados com tendências, sendo que BC0 (GD-PPK sem associação a ponto de controle) tem 3,4x mais chances; BS1 (GD-PPK com associado a um ponto de controle) apresentou 5,3x mais chances e BS3 (GD-PPK associado a três pontos de controle), 2,8x mais chances.

Com relação à avaliação de tendência nos níveis de COBERTURA = V1 (somente as fotos do voo V1, com geometria de coleta por três faixas paralelas) e V1V2 (todas as fotos coletadas nos voos V1 e V2, com geometria de coleta por três faixas paralelas) apresentaram chances iguais de obter dados tendencioso, enquanto V2 (somente as fotos do voo V2, com geometria de coleta por três faixas paralelas) apresentou $\sim 1/7$ x das chances.

A pesquisa apontou fortes indícios de que a falta de ajustamento planimétrico entre as coordenadas das três bases utilizadas na pesquisa é a grande responsável pela concentração de dados tendenciosos nas coberturas V1 e V1V2, uma vez que a cobertura V2 é a única que só utiliza uma única base para todos os dados coletados.

A regressão logística binomial da presença/ausência de tendência, considerando somente dados da variável Cobertura_Voo = VV2 (agrupa COBERTURA = V2 e V2C), apontou que o tratamento CT continua sendo o tratamento que apresenta a menor probabilidade de apresentar dados tendenciosos, sendo que BC0 tem 2x mais chances; BS1, 1,6x mais chances

e BS3, 2,2x mais chances.

Foram investigadas as classificações dos processos de acordo com as exigências das variáveis CN10A e A1000, respectivamente, representantes da análise de compatibilidade com as exigências de classe A do PAP-PCD para produtos altimetricamente compatíveis com curvas de nível de metro em metro e planimetricamente com a escala 1/1000. Tais avaliações podem ser utilizadas diretamente na avaliação dos produtos do tipo Nuvem de pontos.

Os resultados apontaram que as coberturas coletadas pela geometria de três faixas (3F) apresentaram resultados mais precisos, sendo que todas as amostras são, por via de regra, planimetricamente compatíveis com a escala 1/1000 e altimetricamente compatíveis com curvas de nível de metro em metro, ambas compatíveis com as respectivas exigências da classe A no PAP-PCD.

Conclui-se ainda que a estratégia de utilizar pontos de controle distribuídos ao longo do terreno associada às coordenadas de navegação das fotos (TRATAMENTO = CT) foi a que gerou dados com os melhores resultados, com as seguintes características:

a) menor propensão em gerar resultados com erros sistemáticos (tendências);

b) a maior quantidade de amostras compatíveis com a classe A do PAP-PCD na escala 1/1000 — sendo o conjunto que apresentou os melhores resultados de compatibilidade com a escala 1/500;

c) a segunda maior quantidade de amostras altimetricamente compatíveis com curvas de nível de metro em metros na classe A do PEP-PCD, com boa quantidade de amostras se mostrando compatíveis com equidistância de 0,5m nas curvas de nível. O grupo CT só perde para o BC0 que, apesar de não utilizar nenhum ponto de controle, apresentou a maior dependência da translação altimétrica pela média das discrepâncias para apresentar amostras livres de tendências.

Com relação ao atendimento das exigências estabelecidas pelas normas do DNIT para uso de produtos decorrentes de levantamentos aerofotogramétricos em projetos de engenharia rodoviária, conclui-se que todas as nuvens de pontos dos grupos das combinações de TRATAMENTO e COBERTURA avaliadas são planimetricamente compatíveis com a escala 1/2000 na classe A do PEC. Já a avaliação altimétrica indica que, para garantir compatibilidade na produção de produtos capazes de gerar curvas de nível de metro em metro na classe A do PEC, deve-se coletar os dados através da geometria de 3 faixas (“3F”).

Nos casos em que a coleta em faixa única central (FC) seja utilizada, os resultados da pesquisa apontaram que a estratégia de utilizar pontos de controle distribuídos ao longo do terreno associados às coordenadas de navegação das fotos (TRATAMENTO = CT) é a mais

indicada.

Pela metodologia adotada na distribuição das marcações ao longo do trecho, que foram utilizadas tanto como pontos de controle como de checagem, as coberturas FC têm 40 pontos por quilômetro quadrado: o dobro das 3F. Tais densidades, quando utilizadas somente como elementos de checagem, refletem a situação de TRATAMENTO = BC0: grupo de análise que tira partido da correção pós-processada sem pontos de controle. Os resultados da pesquisa apontaram que essa implementação é viável, desde que se utilize da rede de pontos de checagem para a translação altimétrica pela média das divergências, evitando a presença de tendência nessa componente.

Já a comparação entre a associação de um ponto de controle com o GD-PPK (TRATAMENTO = BS1) ou 3 pontos (TRATAMENTO = BS3) aponta que a última é mais precisa e eficaz na geração de dados livres de tendências, sendo a solução GD-PPK que menos necessitou da translação altimétrica.

Dos resultados, portanto, conclui-se que a estratégia de incluir três pontos de controle no processamento fotogramétrico é a mais indicada para se utilizar GD-PPK em coberturas de corredor.

4 ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO, OBTIDOS ATRAVÉS DE AEROFOTOGRAMETRIA POR ARP VERSUS GNSS PARA COBERTURA DE CORREDORES

4.1 Introdução

A engenharia rodoviária se utiliza de representações altimétricas do terreno para predição e mensuração da movimentação de terra, ou seja, dos volumes de solo, em corte, aterro ou “bota fora”, decorrentes da implementação desses projetos e obras no terreno natural. Geralmente, essas representações são geradas a partir de diferentes fontes: sensoriamento remoto orbital, topografia convencional, levantamentos GNSS, aerofotogrametria e outros. Cada um possui diferentes resoluções espaciais e qualidades posicionais — sendo os mais generalistas adequados para estudos e os mais acurados para projetos (PIMENTA; OLIVEIRA, 2004)

A implantação de um segmento rodoviário, principal modal de transportes utilizado no país, envolve uma complexa avaliação de custo-benefício, englobando intrincadas observações e análises socioeconômicas e ambientais. Os projetos rodoviários devem apresentar elementos quantitativos, qualitativos e técnicos detalhados para a sua execução, sendo distinguíveis pelas finalidades a que se destinam. Pode-se citar os tipos geométrico; de terraplanagem; de drenagem; de pavimentação; de obras de arte; de interseções; de obras complementares; de sinalização; de desapropriação e de instalação de operação, como os mais usuais — além do Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental (PEREIRA *et al.*, 2010)

Um produto geoespacial utilizado para representar a porção da superfície terrestre que define o local de implantação de projetos rodoviários é o modelo digital de elevação (MDE). Habitualmente obtido pela interpolação das coordenadas planialtimétricas, de pontos levantados em campo, contudo, os MDE têm a aerofotogrametria via aeronaves remotamente pilotadas (ARP) como uma opção viável para a sua obtenção e utilização em projetos rodoviários (SOUZA, 2019)

Este capítulo analisa comparativamente diferentes MDE, gerados através de aerofotogrametria (variando-se alguns fatores, que influenciam diretamente na qualidade e na produtividade de geração do produto) com um MDE gerado pela interpolação de pontos GNSS, obtidos através de posicionamento RTK, avaliando, sob a ótica da qualidade altimétrica, quais

são os mais apropriados para uso em projetos rodoviários de acordo com a legislação vigente.

Os fatores que impactam o processo aerofotogramétrico investigados foram: a geometria de coleta (comparando-se coletas em corredor com três linhas com aquelas de linha única) e o modo de controle da aerotriangulação (comparando o uso de georreferenciamento direto (GD) de correção pós-processada (PPK) com a utilização de pontos de controle distribuídos ao longo do trecho).

A geometria dos voos aerofotogramétricos, entendida neste estudo como a junção da forma das linhas de voo associadas aos percentuais de recobrimento longitudinal e lateral das fotos, influencia diretamente na qualidade e na produtividade dos levantamentos. A geometria de coleta aerofotogramétrica por voo em corredor, utilizada nesta investigação, é indicada para coberturas de elementos lineares de infraestrutura (rodovias, ferrovias, redes de transmissão, dutos, entre outras), pois otimiza a quantidade de fotos coletadas por área de cobertura, agilizando tanto a coleta quanto o processamento de geração dos produtos decorrentes (Ortomosaicos e Modelos Digitais de Elevação) (WIACEK, 2020).

O georreferenciamento direto (GD) é uma técnica aerofotogramétrica que possibilita a obtenção das posições das fotos (coordenadas e ângulos de atitude) sem a necessidade de pontos de controle, utilizando-se da integração de dados obtidos diretamente dos sensores de voo (GNSS e INS). Para que o GD tenha melhor qualidade posicional, é necessário corrigir a trajetória da aeronave através de posicionamento GNSS relativo cinemático, seja em tempo real (RTK) ou pós-processado (PPK), como aqui utilizado (ZHANG *et al.*, 2019).

A avaliação das quantidades de fotos necessárias para coberturas aerofotogramétricas de elementos lineares de infraestrutura, feita pelo autor ao longo do planejamento da coleta de dados, demonstra que a quantidade mínima para realizar a cobertura é obtida com a coleta por linha única de voo, central ao elemento imageado. Essa geometria de coleta, associada à ausência de pontos de controle em solo, com a utilização do georreferenciamento direto das fotos, seja por PPK ou RTK, pode ser considerada o esquema de maior eficácia, pois apresenta tanto a menor quantidade de fotos quanto a menor necessidade de marcações em solo. Essa implementação otimizada, todavia, pode acrescentar erros aos produtos decorrentes causados por falta de rigidez geométrica na coleta, impedindo seu uso em projetos que exijam bons níveis de qualidade posicional (WIACEK, 2020; TOURNADRE *et al.*, 2015).

Os produtos gerados neste estudo foram verificados quanto à sua adequação às exigências do Padrão de Acurácia Posicional, para Produtos Cartográficos Digitais (PAP-PCD),

para a geração de produtos compatíveis com curvas de nível de metro em metro e de equidistância igual a meio metro.

A legislação do DNIT aponta que os produtos decorrentes de processos aerofotogramétricos, para uso em projetos executivos de engenharia rodoviária, devem ser altimetricamente compatíveis às curvas de nível de metro em metro na Classe A do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC, BRASIL, 1984) — equivalente à Classe B do PAP-PCD.

Por fim, busca-se avaliar as diferenças da expectativa de movimentação volumétrica de solo ao se utilizar os diferentes modelos do terreno, gerados através de diferentes técnicas, a saber, aerofotogrametria por ARP e GNSS, avaliados na implantação de um projeto linear ao longo de 1660 m do segmento rodoviário.

4.2 Revisão bibliográfica

Pimenta e Oliveira ressaltam que “a estrada é um ente tridimensional que deve se ajustar de forma harmônica à topografia da **região**” (2004, p. 1), sendo que “o movimento de terra, que geralmente representa parcela significativa no custo total de construção da estrada, depende da topografia do **local** atravessado” (2004, p. 2, grifos do autor).

Dessas afirmações, evidencia-se que os produtos geoespaciais, utilizados na caracterização das porções da superfície terrestre em que os estudos e projetos rodoviários desenvolvidos, devem estar condizentes com a etapa do processo. Os estudos da **região** podem tirar partido de produtos mais generalistas, que têm ampla abrangência geográfica (por vezes global) e acurácia altimétrica na faixa do metro, enquanto as avaliações do **local** devem utilizar produtos com acurácia altimétrica até algumas dezenas de centímetros e que, via de regra, têm representação geográfica restrita.

Um produto geoespacial bastante usual para representar essa porção da superfície terrestre é o Modelo Digital de Elevação (MDE). A Norma para Especificação Técnica para Produtos de Conjunto de Dados Geoespaciais (ET-PCDG) do Exército Brasileiro define MDE como um “produto cartográfico obtido a partir de um modelo matemático que representa um fenômeno, de forma contínua, a partir de dados adequadamente estruturados e amostrados do mundo real” (EB, 2016, p. 6-1).

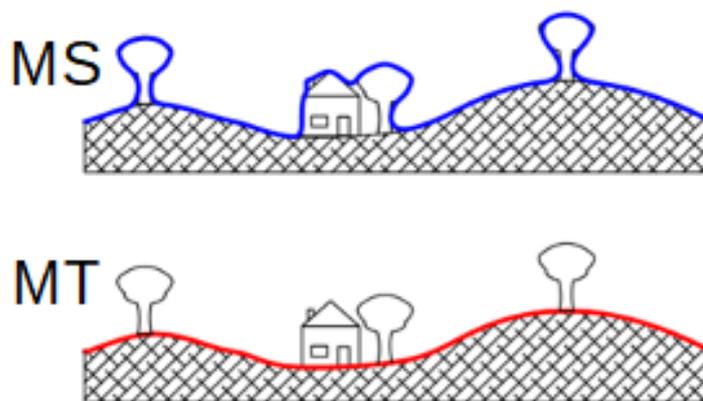
Em se tratando da superfície terrestre, o MDE pode ser dividido em “Modelo do Terreno” (MT), contendo somente amostras de solo exposto, ou “Modelo da Superfície” (MS), quando representa o solo e os elementos naturais e artificiais sobre ele (vegetação, edificações etc.). As informações planialtimétricas necessárias para a geração de MT e/ou MS podem ser

“obtidas de forma indireta — como no caso da fotogrametria terrestre ou da aerofotogrametria; ou de forma direta — via medições em campo, com o uso de receptores GNSS e/ou uso de estações totais” (EB, 2016, p. 6-1).

A coleta das informações planialtimétricas em campo gera uma nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais, a partir das quais são gerados os produtos MS e MT. Nos produtos MS utiliza-se todo o conjunto de dados obtidos, caso tenha cobertura de todos os elementos da superfície (há casos que são coletados pontos diretamente no terreno, como nos levantamentos topográficos ou por GNSS), enquanto na confecção dos MT os pontos são filtrados, para que permaneçam somente aqueles pertencentes ao solo exposto.

A Figura 4.1 demonstra esquematicamente as diferenças entre os Modelos de Superfície (MS) e Modelos do Terreno (MT).

Figura 4.1- Diferenças entre Modelo de Superfície (MS) e Modelo do Terreno (MT)



Fonte: adaptada de < <https://docs.maply.io/analizando-dados/modelos-digitais/> > Acesso em 03/09/2022.

Utiliza-se MT ou MS de acordo com a aplicação desejada para a superfície gerada. Polidori e Hage indicam, por exemplo, que

[...] um MS é adequado para ortorretificação de imagens (no processo fotogramétrico), pois requer informações sobre a elevação do topo de edifícios e árvores, ou seja, objetos visíveis nas imagens, enquanto um MT é necessário para modelagem hidrológica que precisa de informações sobre o nível de o solo onde a água da superfície escoar (2020, p. 3, tradução do autor).

Os produtos MS e MT podem tanto ser armazenados em formato vetorial, no qual uma malha triangular tridimensional, suavizada por um modelo matemático, é obtida a partir da nuvem de pontos da superfície; quanto em formato *raster*, no qual as células de uma matriz armazenam valores altimétricos interpolados a partir da referida nuvem de pontos.

A ET-PCDG (EB, 2016) cita que os produtos em formato vetorial são MODELOS

DIGITAIS, enquanto aqueles no formato raster são MODELOS NUMÉRICOS.

Assim, um modelo digital do terreno (MDT) ou um modelo digital da superfície (MDS) se referem a produtos no formato vetorial de MT e MS, respectivamente. Já um modelo numérico do terreno (MNT) ou um modelo numérico de superfície (MNS) se referem, respectivamente, aos MT e MS em formato raster (ou matricial).

Tommaselli indica que “fotogrametria aérea (ou aerofotogrametria) é uma subdivisão da fotogrametria, na qual as fotografias do terreno são tomadas por uma câmara de precisão montada em uma aeronave (2009, p. 2)”. Já o levantamento aerofotogramétrico com uso de aeronaves remotamente pilotadas (ARP) é uma atividade técnica de coleta de dados em que câmeras fotográficas digitais não métricas de pequeno formato são embarcadas em aeronaves dotadas de Sensores Inerciais de Navegação (INS) e de receptores GNSS. Isso permite ao equipamento realizar coleta autônoma de fotos, em uma área pré-planejada por uma missão, com a devida sobreposição entre as fotos que permita a extração de dados pelo processo fotogramétrico.

A sigla RPA (*Remotely Piloted Aircraft*) é usada na regulamentação nacional do uso não recreativo das aeronaves comumente chamadas de “drones”, enquanto RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*) agrega ao RPA todos “os enlaces de comando e controle requeridos e quaisquer outros elementos que podem ser necessários a qualquer momento durante a operação” (COMANDO DA AERONÁUTICA, 2017). No Brasil, apesar de o termo RPA estar presente na legislação, o usual é usar a sigla ARP, de Aeronave Remotamente Pilotada. A Figura 4.2 exibe alguns exemplos de modelos de ARP disponíveis.

O processo fotogramétrico se dedica à “reconstrução digital dos objetos pertencentes à cena fotografada, a partir do cálculo da posição tridimensional de pontos homólogos, presentes em duas ou mais imagens, pela triangulação de raios projetivos formados entre a câmara e os pontos investigados” (adaptado de MOONS *et al.*, 2008).

Com essa configuração, a coleta aerofotogramétrica via ARP é classificada como “passiva, de múltiplas perspectivas”,⁹ em que os sistemas utilizam fonte externa de iluminação (luz do Sol) para obter imagens do terreno sob diferentes pontos de vista. A Figura 4.3 apresenta esquematicamente como é feita a triangulação para a obtenção dos pontos.

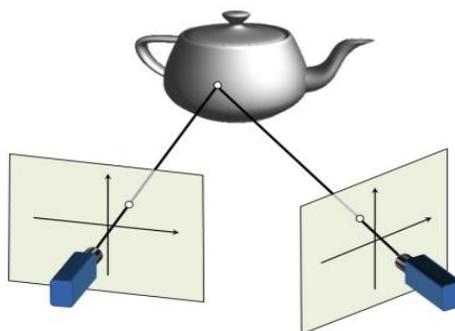
⁹ MOONS *et al.* (2008), pg. 292.

Figura 4.2- Exemplos de modelos de ARP, aeronaves remotamente pilotadas



Fonte: Adaptada de <<https://aeroengenharia.com/>> . Acesso em 24/06/2022.

Figura 4.3- Triangulação de raios projetivos na determinação de um ponto pertencente à feição.

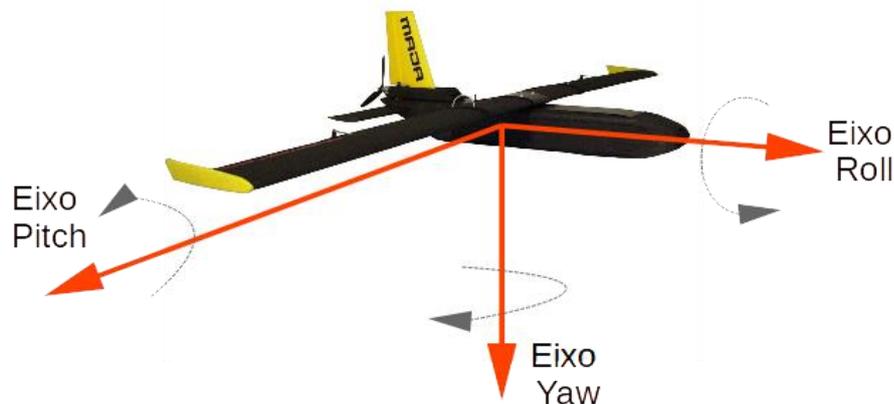


Fonte: adaptada de MOONS et. al (2008)

A iteração da triangulação dos inúmeros pontos homólogos nas várias imagens acaba por gerar uma nuvem de pontos que representam tridimensionalmente o objeto imageado. O manual do software fotogramétrico METASHAPE nomeia o processo de triangulação como “alinhamento” das fotos, etapa na qual o programa “encontra automaticamente pontos de amarração e estima os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera” (AGISOFT, 2021, p. 39). Os parâmetros extrínsecos são conhecidos como os de orientação exterior (POE), compreendidos pela associação das coordenadas tridimensionais X, Y, Z (UTM-E, UTM-N e Altitude ortométrica), do centro projetivo (CP), da lente com os ângulos de atitude da câmera

(*roll*, ω ; *pitch*, φ e *yaw*, κ), obtidos no momento da tomada de cada foto. A Figura 4.4 mostra os eixos e sentidos de rotação considerados.

Figura 4.4: Rotação nos eixos de coleta



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Já os parâmetros intrínsecos são os de orientação interior (POI), compostos pela distância focal (f); pelas coordenadas de ponto principal (x_0 , y_0); pelos coeficientes de afinidade e não ortogonalidade (B_1 , B_2); pelos coeficientes de distorção radial (K_1 , K_2 , K_3 , K_4) e pelos coeficientes de distorção tangencial (P_1 , P_2) da lente.

AGISOFT (2021) explica, ainda, que os POI podem ser obtidos através da pré-calibração da câmera ou podem ser estimados durante o alinhamento, sendo modificados cada vez em que há a otimização do alinhamento — procedimento que recalcula os POI e os POE, ajustando todo conjunto de dados para o menor erro possível diante dos parâmetros de processamento.

Javadnejad *et al.* (2021) descreve em minúcias o processo de fotogramétrico, para a obtenção da estrutura tridimensional das superfícies imageadas, a partir de câmeras digitais não métricas, como as utilizadas nos levantamentos via ARP. Em resumo, são utilizadas duas técnicas computacionais no processo, a “Structure from Motion” (SfM) e a “Multiview Stereopsis” (MVS), que, dada a interrelação constante entre elas, é comumente denominado de processo SfM-MVS.

Os autores supracitados explicam que o SfM é utilizado na etapa de orientação das fotos, gerando a nuvem esparsa de pontos de amarração, enquanto o MVS é responsável por aumentar a quantidade de pontos da nuvem de amarração, obtendo uma nuvem densa de pontos: produto geoespacial que é base para a obtenção tanto do Modelo de Superfície (em que todos os pontos obtidos são utilizados para a geração de malha triangular tridimensional) quanto do Modelo do Terreno (em que somente os pontos classificados como pertencentes ao solo exposto

são utilizados para a geração da malha).

Uma vez obtidos esses produtos, faz-se necessário avaliar a qualidade obtida. A avaliação da qualidade posicional é importante para verificar se o produto gerado representa o objeto imageado de forma espacialmente acurada. Ariza e Gordo explicam que a falta de acurácia posicional em produtos geoespaciais indica “distorção posicional entre produtos [...]” sendo “[...] uma barreira à interoperação entre os mesmos. Essa barreira não é apenas para os aspectos posicionais e geométricos, mas também para os temáticos que são muito afetados pela posição” (2008, p. 45).

A qualidade é dada em função da acurácia posicional dos elementos do produto, sejam pontos, linhas, áreas, células etc., em um sistema apropriado de projeção, sendo necessário, para que se possa afirmar que os produtos são posicionalmente acurados, avaliar se não apresentam erros sistemáticos (tendências) ou grosseiros nas suas medidas, sejam planimétricas ou altimétricas (ARIZA-LÓPEZ; RODRÍGUEZ-AVI, 2015).

Para que a avaliação posicional possa ser considerada acurada, é necessário que o conjunto de dados avaliados não apresente medidas enviesadas, nem por erros grosseiros nem por erros sistemáticos e que, preferencialmente, a medida de associação das discrepâncias reflita a mescla do valor de tendência central (usualmente a média) com o de dispersão em torno deste (usualmente o desvio padrão), sendo frequentemente utilizada a raiz quadrada do erro médio (RMSE). O RMSE é a medida utilizada internacionalmente em vários padrões de qualidade cartográfica, como o *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA), do governo federal norte-americano (FGDC, 1998) e o *Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data* (ASPRS, 2014).

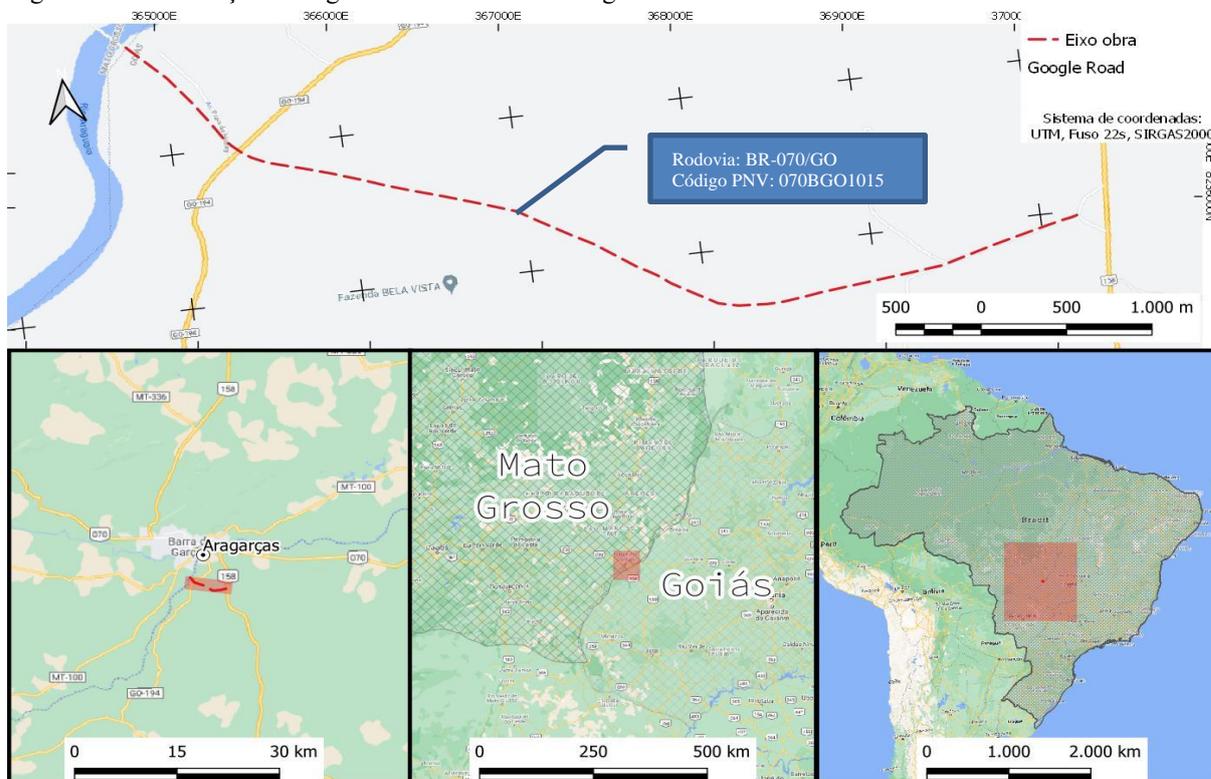
No Brasil o RMSE é a medida indicada como referência para avaliação dos produtos cartográficos no Padrão de Acurácia Posicional para Produtos Cartográficos Digitais (PAP-PCD), publicado na Norma para Especificação Técnica para Produtos de Conjunto de Dados Geoespaciais (ET-PCDG) do Exército Brasileiro (EB, 2016).

Qassim Abdullah, professor da Universidade da Pensilvânia (USA), lembra que a produção de ORTOMOSAICO e MDE, “após a etapa de alinhamento, pode introduzir variações que impactem a qualidade final dos produtos” (ABDULLAH, 2020, p. 736). A sugestão do pesquisador é que a análise de qualidade posicional seja feita com os valores obtidos de forma direta nos produtos finais obtidos no processo.

4.3 Materiais e métodos

Os dados aqui usados para a geração dos modelos da superfície, foram coletados sobre o contorno rodoviário do município de Aragarças (GO), um segmento da BR-070, de código 070BGO1015 no Plano Nacional de Viação (PVN) e que se encontrava em obras de implantação e pavimentação. O Projeto Geométrico da obra (DNIT, 2018) apontava o início da obra na estaca E-0+00 (interseção em desnível com a BR-158) e o final na estaca E-317+9,60 (ponte sobre o Rio Araguaia — Divisa GO/MT), com extensão total de 6.349,60 metros. A Figura 4.5 indica o local de estudo e o traçado do eixo do trecho analisado.

Figura 4.5- Localização do segmento rodoviário investigado.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

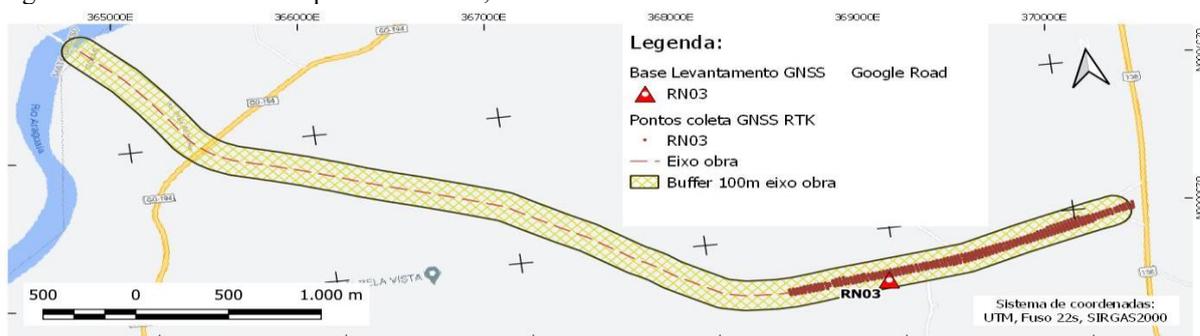
4.3.1 Coleta dos pontos GNSS para caracterização da superfície

O levantamento de pontos, através de receptor GNSS, não cobriu toda a extensão do trecho em obras, tendo sido realizado ao longo de 1.920 m do eixo — partindo do aterro em obras do viaduto (E05+00) até o segundo bueiro da obra (E102+00). O serviço foi executado 45 dias depois dos voos de cobertura aerofotogramétrica. A escolha desse trecho levou em consideração que não foram executados serviços nessa parte ao longo desses 45 dias —

garantindo que os dois levantamentos representassem a mesma superfície.

Como pontos de base para os levantamentos realizados nessa pesquisa, usou-se a rede planialtimétrica da obra, implantada ao longo do trecho e materializada por marcos de concreto. A determinação das coordenadas das marcações foi realizada através de um par de receptores GNSS, de dupla frequência, modelo TOPCON HIPER II, com rádio UHF interno, para correções GNSS/RTK. O RN03 foi utilizado como base e o tempo de ocupação, com solução RTK fixa, foi de 1s em cada ponto. A Figura 4.6 demonstra a distribuição dos pontos coletados ao longo da área desse estudo.

Figura 4.6- Pontos coletados por GNSS/RTK, entre as estacas E5+00 e E102+00 da obra.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Destaca-se que inicialmente, este segmento foi percorrido a pé, coletando-se os pontos distribuídos perpendicularmente ao seu eixo espaçados de acordo com as estacas de projeto (de 20 em 20 metros), realizando-se linhas de coleta, em média, com 20 metros para cada lado do eixo (40 metros no total). A coleta dos dados consumiu cerca de 8h de trabalho com dois operadores em campo.

Os pontos coletados foram cadastrados com os seguintes códigos de elementos, que indicam mudanças de declividade nas seções transversais:

- a) (BD) — bordo da rodovia;
- b) (EX) — eixo da rodovia;
- c) (TN) — terreno natural;
- d) (CR) — crista do terreno em corte ou aterro, e
- e) (PE) — sopé do terreno em corte ou aterro.

Foram coletados 983 pontos em 11,0 hectares (0,11 km²) da superfície estudada, o que representa uma densidade de 89 pontos/ha — valor acima daqueles indicados pela NBR 13.333 (ABNT, 1994), que indica o mínimo de 18 pontos/ha para terrenos com baixa declividade, como é o caso do trecho levantado.

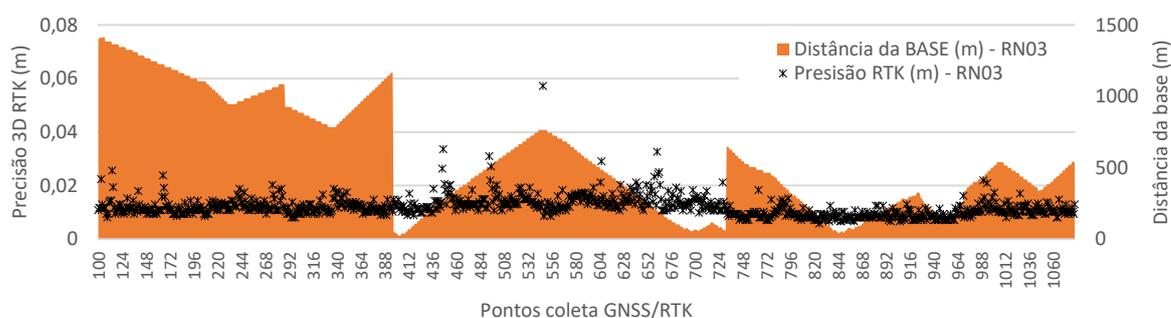
O programa TOPCON MAGNET OFFICE TOOLS, utilizado no processamento

dos pontos GNSS, disponibilizou os campos “*Horizontal precision (m)*” (PH) e “*Vertical precision (m)*” (PV) na indicação da qualidade do processamento para cada ponto. A partir desses valores foi calculada, de acordo com a Equação 1, a precisão tridimensional (P3D) de cada ponto.

$$P3D_i = \sqrt{PV_i^2 + PH_i^2} \quad (1)$$

O valor médio de P3D do posicionamento RTK na coleta ficou em 1,11 cm, sendo o pior resultado obtido de 5,60 cm. A Figura 4.7 traz o gráfico da dispersão de P3D e das distâncias-base da solução RTK, para os 983 pontos GNSS/RTK coletados (a maior distância de linha de base com relação ao marco RN03 foi de 1.450,00 m).

Figura 4.7- Dispersão das precisões nos pontos de coleta GNSS/RTK.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

4.3.1.1 Pontos de checagem para coleta GNSS/RTK

De acordo com a NBR 13.330 (ABNT, 1994), deve-se separar o mínimo de 2% de pontos para análise de aceitação do produto. No caso do MNT gerado a partir da coleta de pontos GNSS, a análise de aceitação foi exclusivamente altimétrica. Foram separados 25 pontos (~2,5%) para a análise de qualidade, distribuindo-os ao longo da área de coleta e respeitando a representatividade das classes coletadas em campo. Assim, selecionou-se:

- a) 3 pontos “BD”;
- b) 5 pontos “CR”;
- c) 3 pontos “EX”;
- d) 5 pontos “PE”; e
- e) 9 pontos “TN”.

Os pontos selecionados não participaram nem da interpolação, nem da formação de

linhas de quebra. A densidade de pontos de checagem nesse caso é de $\sim 2,3$ pontos por hectare, equivalente a ~ 227 pontos por quilômetro quadrado.

4.3.2 Cobertura aerofotogramétrica

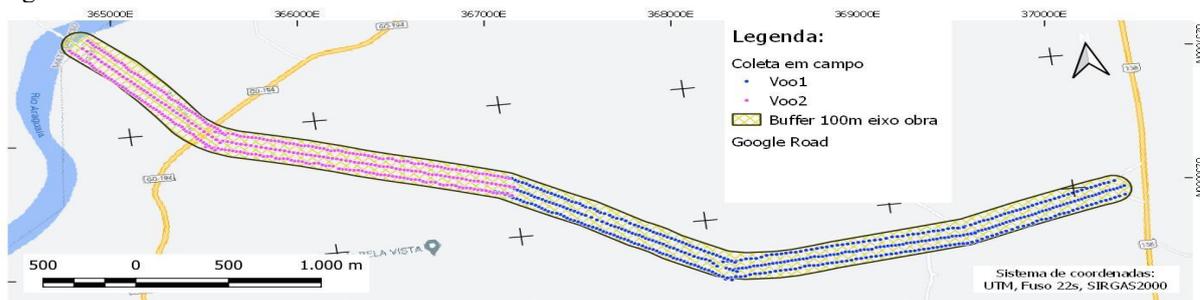
Foram realizados dois voos para cobertura do segmento entre as estacas E5+00 e E317+00 (6.240,0 m) — excluindo, assim, as obras do viaduto e da ponte.

A coleta ocorreu em 26 de setembro de 2020, um dia sem nuvens. O horário do pôr-do-sol na localidade garantiu a V1 uma condição “ideal” de iluminação e a V2 uma condição “suficiente”. O primeiro voo (V1) capturou 472 fotos e o segundo (V2), outras 367 fotos — totalizando 839 fotos na cobertura (V1V2). A coleta consumiu cerca de duas horas em campo, com início por volta das 15h50, horário local. A duração de V1 foi de cerca de 20 minutos no ar e V2, outros 10 minutos.

Foi utilizada a ARP senseFly EBEE PLUS do tipo asa fixa. A aeronave conta com sensor GNSS de simples frequência e IMU de navegação, responsáveis, respectivamente, pela captura das coordenadas e atitudes da aeronave, que possibilitam a obtenção da trajetória corrigida da aeronave por processamento cinemático pós-processado (PPK) ou em tempo real (RTK). A câmera fotográfica digital utilizada foi a senseFly S.O.D.A, com distância focal fixa de 10,6mm e sensor de 20 megapixels, de 1 polegada de diâmetro — o conjunto é interligado aos sensores GNSS/IMU, permitindo a realização do Georreferenciamento Direto (GD) da posição das fotos.

A geometria dos planos de voo das coletas V1 e V2 foi em formato de corredor, com 3 linhas, com recobrimentos longitudinal e lateral de 80% e 60%, respectivamente. A altura de voo de foi de 120m, obtendo-se um *Ground Sample Distance* (GSD) de 2,8 cm. A área de recobrimento foi equivalente a um *buffer* de 100 m de raio em torno do eixo do trecho. A Figura 4.8 demonstra a área coberta pela coleta realizada em campo.

Figura 4.8- Área de cobertura dos voos.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

O Quadro 4.1 apresenta o resumo da coleta aerofotogramétrica.

Quadro 4.1- Resumo da coleta aerofotogramétrica

Dados Gerais		Fotos coletadas	Geometria da coleta		
Aeronave	SenseFly EBEE PLUS	Voo V1	472	Cobertura corredor	3 faixas
Câmera	SenseFly S.O.D.A	Voo V2	367	Recobrimento lateral	60%
Atura voo	120 m	Total	839	Recobrimento longitudinal	80%
GSD	2,8 cm	Tempo de coleta		Trecho coletado	
Qdt. Voos	2	Total	120 min	Código PNV	070BGO1015
Coleta realizada no dia 26/09/2020, com início às 15:50		Tempo V1	20 min	Extensão coleta	6.240 m
		Tempo V2	10 min	Área coleta	64,4 hectares

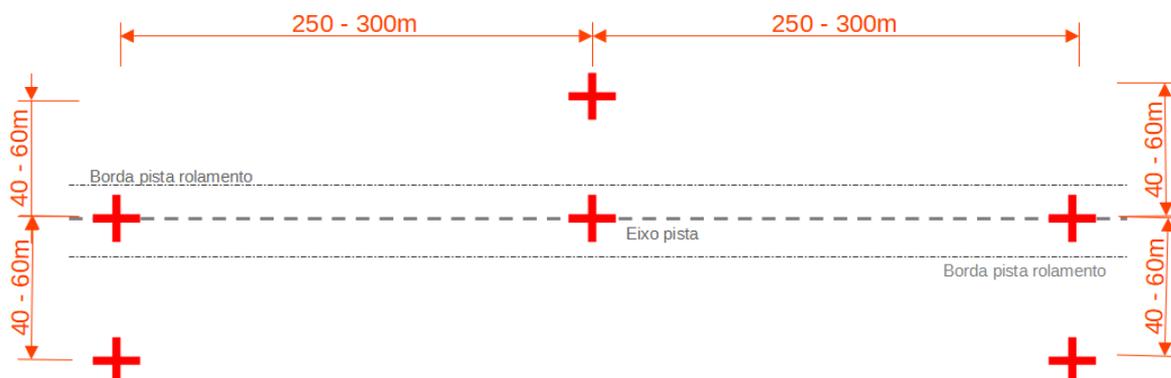
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.3.2.1 Controle e checagem aerofotogramétricos

O planejamento da distribuição das marcações de solo, utilizadas como pontos de controle ou checagem no processo fotogramétrico, foi realizado objetivando a cobertura total do segmento rodoviário estudado, obedecendo à seguinte estratégia: a cada 250m - 300m do eixo da obra, foi feita uma marcação na plataforma da pista de rolamento. O conjunto dessas marcações serviu para o controle da linha central do levantamento aerofotogramétrico.

Para o controle das linhas à “esquerda” e à “direita”; a estratégia foi usar pontos alternados — hora para a esquerda, hora para a direita — com a distância de *offset* do eixo variando entre 40 e 60m. A Figura 4.9 traz o esquema geral que norteou a implementação das marcações.

Figura 4.9- Vista superior do esquema de distribuição das marcações em solo

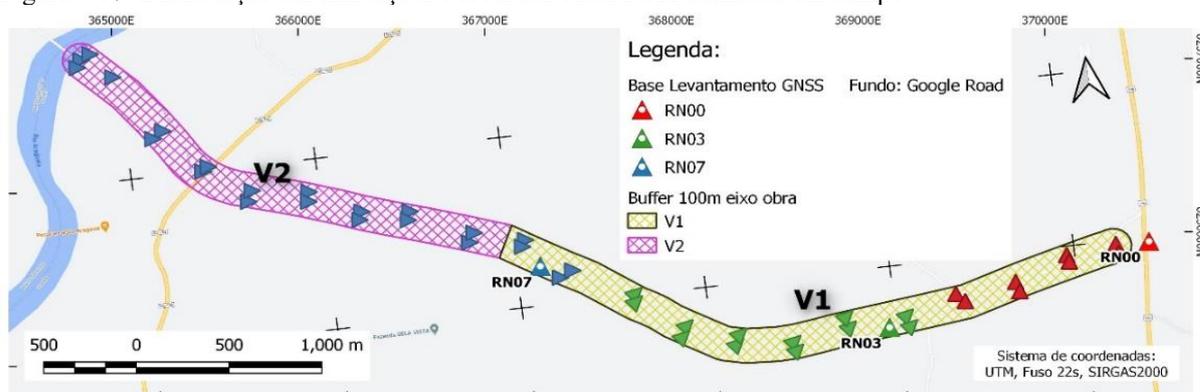


Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A determinação das coordenadas das marcações foi realizada através de receptores GNSS de dupla frequência, com a realização de posicionamento cinemático em tempo real (GNSS-RTK) e a utilização de alguns marcos planialtimétricos implantados para controle da

obra, como pontos de base para o posicionamento. A Figura 4.10 demonstra a distribuição das marcações em solo ao longo do segmento rodoviário estudado e a posição dos marcos RN00, RN03 e RN07, utilizados como base do posicionamento GNSS-RTK.

Figura 4.10- Distribuição das marcações e local das bases RTK utilizadas em campo.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Das 46 marcações implantadas, cinco não foram utilizadas — uma delas foi perdida pela movimentação de solo da obra e o restante pela falta de cobertura no momento do voo (foram implantadas na área da obra do viaduto). A pintura das marcações foi realizada por duas pessoas, consumindo dois dias de serviço; já a medição foi executada em meio dia de serviço, pela mesma equipe.

Para verificar e garantir a qualidade planimétrica das coordenadas dos marcos RN ocupados nesta investigação, executou-se um posicionamento diferencial estático rápido em cada marco, usando como referência a estação MTGA, pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS em tempo real (RBMC-IP), formando linhas de base inferiores a 15km. A aquisição dos dados da base foi feita através da internet, com a taxa de 1Hz. Na ocupação dos marcos, foram usados receptores GNSS de dupla frequência, durante 20 minutos, com taxa de 1Hz — esses parâmetros estão de acordo com as “Recomendações para levantamentos relativos estáticos — GPS” (IBGE, 2008).

O processamento foi realizado através do software *Leica Geo Office 8.4*, obtendo-se a realização planimétrica, que identificou diferenças bidimensionais de 0,04 metros; 0,37 metros e 0,85 metros com relação aos dados originais dos marcos RN00, RN03 e RN07, respectivamente. Ressalta-se que a documentação original dos marcos (DNIT, 2018) não identifica o método ou equipamentos utilizados na determinação planimétrica dos marcos RN, fato que impede a avaliação do seu nível de confiabilidade. A tentativa de processamento fotogramétrico com as posições originais dos marcos resultou em erros posicionais da aerotriangulação de até alguns poucos metros, incoerentes com o processo. Diante desses fatos,

partiu-se para o uso dos dados reprocessados, obtendo-se assim, resultados compatíveis com a qualidade sub decimétrica pretendida para o levantamento.

A qualidade altimétrica dos marcos não foi avaliada, tendo sido adotados os valores indicados na documentação da obra, que indica a realização de nivelamento e contranivelamento geométrico, a partir do marco inicial de referência da obra (MO-435), realizado pelo sistema de posicionamento de ponto preciso, fornecido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (PPP-IBGE), a partir de uma sessão única de ocupação, com 8h de duração. Essa metodologia garante que as altitudes ortométricas dos marcos RN são precisas, seguindo o terreno natural a partir de uma altitude ortométrica, calculada pela ondulação geoidal fornecida pelo PPP-IBGE (MAPGEO2015, à época do levantamento).

4.3.2.2 Variações de geometria de coleta e de controle aerofotogramétrico

A partir da cobertura aérea executada, foram realizados processamentos fotogramétricos na área coberta pelo levantamento GNSS/RTK, a fim de investigar a interação de dois tipos de geometria de coleta em corredor, quais sejam, todas as fotos das três faixas e as fotos somente da faixa central, com três tipos de controle aerofotogramétrico (utilização de pontos de controle distribuídos ao longo do trecho; utilização exclusiva do georreferenciamento direto por processamento pós processado (GD/PPK) e sem pontos de controle; e com o uso de GD/PPK associado a três pontos de controle em campo.

A avaliação dos arranjos geométricos do levantamento aerofotogramétrico foi realizada na variável COBERTURA, com quatro níveis:

- a) O nível “V1” indica o processamento dos dados do primeiro voo com três linhas de coleta;
- b) O nível “V1C” indica o processamento dos dados do primeiro voo considerando somente a linha central de coleta;
- c) O nível “V1V2” indica o processamento dos dados do primeiro voo associados ao do segundo voo, com três linhas de coleta;
- d) O nível “V1V2C” indica o processamento dos dados do primeiro voo associados ao do segundo voo, considerando somente a linha central de coleta;

Os níveis de COBERTURA V1C, V2C e V1V2C representam a geometria de coleta com linha única, que otimiza o processo pela diminuição da quantidade de fotos coletadas por área de cobertura. Essa otimização gera uma estrutura geométrica de coleta menos robusta, o

que pode implicar uma perda significativa de qualidade nos produtos dela decorrentes (WIACEK, 2020; TOURNADRE *et al.*, 2015).

A utilização das fotos com posições obtidas por GD/PPK foi avaliada em três níveis, na variável TRATAMENTO:

a) O nível “CT” representa a ausência de correção GD/PPK. É a solução que usou pontos de controle ao longo da cobertura em combinação com as coordenadas de navegação das fotos na aerotriangulação;

b) O nível “BC0” representa a utilização das fotos GD/PPK sem associação de pontos de controle na aerotriangulação;

c) O nível “BS3” representa a utilização das fotos GD/PPK em associação a três pontos de controle na aerotriangulação.

O último caractere da variável TRATAMENTO indica a quantidade de pontos de controle associados ao processo fotogramétrico, nos níveis que utilizam as coordenadas obtidas no processamento PPK: “BS3” utilizou três pontos e “BC0” não utilizou nenhum ponto como controle (todos os pontos foram usados como checagem).

Para os produtos do nível “CT”, foram usados 60% dos pontos disponíveis em cada cobertura como pontos de controle e 40% fizeram parte do plano de amostragem de checagem.

4.3.2.3 Plano de amostragem

Plano de amostragem, de acordo com norma ISO 2859-1 (ISO, 1999), é a combinação entre um tamanho de amostra e um critério de aceitação. O plano de amostragem aqui usado baseou-se nas indicações contidas no documento “Avaliação da Qualidade de Dados Geoespaciais”, para inspeção amostral de pontos de controle por área, onde considera-se o produto como um lote de inspeção de tamanho (N), formado por células 10x10 cm na escala de análise, em que se deve avaliar uma amostra de tamanho (n), obtida pela observação de um limite de qualidade aceitável (LQA) em um dado nível de inspeção (1, 2 ou 3). No mesmo documento há a indicação de adensamento da amostragem para o nível de células com 4x4 cm na escala de análise, “para aferição de fenômenos contínuos de hidrografia” (IBGE, 2019, p. 32).

De acordo com ISO (1999), o nível de inspeção correlaciona o nível de confiança dos produtos à quantidade amostral de elementos a serem inspecionados. Assim, produtos que sejam considerados consolidados — contando com alta confiabilidade por parte do avaliador

— podem ser avaliados por um nível amostral menor, visando otimizar o processo e os custos de inspeção. O ciclo de avaliação inicia no nível 2 e, com a estabilidade dos resultados de avaliação, passa para nível 1, podendo voltar ao nível 2 em caso de mudanças no processo ou problemas de produção; chegando ao nível 3 nas situações em que duas ou mais inspeções de nível 2 tenham tido resultados insatisfatórios; retornando ao nível 2 caso cinco inspeções consecutivas tenham sido aceitas — reiniciando o ciclo.

Na norma ISO 2859-1, o limite de qualidade aceitável (LQA) correlaciona o tamanho de amostra (n) a um número de aceitação (Ac) — que indica a quantidade de elementos não conformes aceitos no plano de amostragem. Sugere-se adotar LQA de 4% e nível 2 de inspeção para a avaliação de qualidade posicional absoluta de produtos geoespaciais (IBGE, 2019).

Neste experimento usou-se a escala 1/2.000 como base do plano amostral, devido a ser esta a escala cartográfica sugerida na publicação IPR-726 (DNIT, 2006) para o uso de produtos aerofotogramétricos em projetos executivos de engenharia rodoviária. O procedimento de cálculo seguiu as seguintes etapas:

- a) Dada a área de cobertura, por exemplo: $V1V2 = 1,84 \text{ km}^2$;
- b) Obtém-se a população “N” de 10x10 cm na escala investigada: $1/2.000 = \sim 46$ células;
- c) Verifica-se a quantidade de amostras para lote “N” (46 elementos) na tabela de LQA 4% e nível 2 de inspeção: “n” = 8 e “Ac” = 1 (8 amostras de checagem, podendo aceitar a não conformidade em uma).¹⁰

A Tabela 4.1 traz o resumo das quantidades de pontos e fotos nas coberturas, indicando que o grupo V1V2-CT contém 16 pontos de checagem — o dobro da quantidade “n” sugerida pelo presente procedimento. Esse mesmo grupo tem 14 pontos de controle por quilômetro quadrado, mantendo a expectativa de se obter mais do que 10 pontos de controle por quilômetro quadrado, seguindo as indicações de Ferrer-González *et al.* (2020).

Em todas as coberturas, a quantidade de pontos de checagem foi maior que a indicada pelo presente procedimento — via de regra é o dobro. O plano de amostragem usado atendeu às seguintes escalas e níveis de inspeção, preconizados por IBGE (2019): (1) Escala 1/2.000, LQA 4% no nível 2 de inspeção; e (2) escala 1/1.000, LQA 4% no nível 1 de inspeção.

Convém ressaltar que o plano de amostragem implantado foi planejado para distribuir os pontos de controle/checagem da pesquisa com a utilização do padrão de 10x10 cm,

¹⁰ No caso do adensamento 4x4 cm seriam 50 pontos de controle, com “Ac” de 5.

adequando a amostra para a escala 1/2000. Caso a amostragem considerada fosse baseada em células de 4x4 cm, a quantidade de pontos utilizados na pesquisa seria compatível com a análise na escala 1/5.000

A decisão pela utilização do padrão 10x10 cm se deu pela economicidade na etapa de campo a partir da consideração técnica de que a característica topográfica do terreno é suavemente ondulada — caso fosse mais movimentada, teria sido aplicado o esquema de 4x4 cm.

Tabela 4.1 – Resumo quantitativo de elementos nos grupos de análise.

ARRANJO DE COLETA: 3 FAIXAS PARALELAS (3F)												
PROCESSAMENTO	SEPARADO								JUNTO			
COBERTURA	V1				V2				V1V2			
ÁREA COBERTA (KM2)	1.06				0.83				1.84			
QUANTIDADE FOTOS	472				367				839			
FOTOS/KM2	445				442				456			
GSD COLETA	2,8 cm											
POSICIONAMENTO FOTOS	PPK			NAV	PPK			NAV	PPK			NAV
QUANTIDADE PTS CONTROLE	0	1	3	14	0	1	3	11	0	1	3	25
QUANTIDADE DE PTS CHECAGEM	24	23	21	10	19	18	16	8	41	40	38	16
CONTROLE/KM2*	445	446	448	13	442	443	446	13	456	457	458	14
CHECAGEM/KM2	23	22	20	9	23	22	19	10	22	22	21	9
TRATAMENTO	BC0	BS1	BS3	CT	BC0	BS1	BS3	CT	BC0	BS1	BS3	CT
GRUPO DE ANÁLISE	V1-BC0	V1-BS1	V1-BS3	V1-CT	V2-BC0	V2-BS1	V2-BS3	V2-CT	V1V2-BC0	V1V2-BS1	V1V2-BS3	V1V2-CT
ARRANJO DE COLETA: FAIXA ÚNICA CENTRAL (FC)												
PROCESSAMENTO	SEPARADO								JUNTO			
COBERTURA	VIC				V2C				V1V2C			
ÁREA COBERTA (KM2)	0.61				0.43				1.02			
QUANTIDADE FOTOS	171				107				278			
FOTOS/KM2	280				249				273			
GSD COLETA	2,8 cm											
POSICIONAMENTO FOTOS	PPK			NAV	PPK			NAV	PPK			NAV
QUANTIDADE DE PTS CONTROLE	0	1	3	14	0	1	3	11	0	1	3	25
QUANTIDADE DE PTS CHECAGEM	24	23	21	10	19	18	16	8	41	40	38	16
CONTROLE/KM2*	280	282	285	23	249	251	256	26	273	274	275	25
CHECAGEM/KM2	39	38	34	16	44	42	37	19	40	39	37	16
TRATAMENTO	BC0	BS1	BS3	CT	BC0	BS1	BS3	CT	BC0	BS1	BS3	CT
GRUPO DE ANÁLISE	V1C-BC0	V1C-BS1	V1C-BS3	V1C-CT	V2C-BC0	V2C-BS1	V2C-BS3	V2C-CT	V1V2C-BC0	V1V2C-BS1	V1V2C-BS3	V1V2C-CT

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

* Considerou-se como controle os elementos que apresentam correções diferenciais – fotos PPK e marcações RTK.

Mesa-Mingorance e Ariza-López apontam que “só recentemente os padrões de precisão posicional (e.g., UNE 2016, ASPRS 2014) começaram a vincular o tamanho da amostra ao tamanho da área a ser controlada (2020, p. 17)”. Os autores lembram que, tradicionalmente, as normas indicam uma quantidade mínima aceitável — sendo 20 pontos de controle, o valor habitual.

Na avaliação da área coincidente entre os diferentes produtos, quais sejam, os 12 gerados no levantamento aerofotogramétrico e um através do levantamento GNSS, todos os 983 pontos coletados foram usados para avaliação altimétrica dos produtos fotogramétricos gerados pelo levantamento, gerando uma amostra de checagem bem mais robusta do terreno,

que excede os parâmetros habituais dos padrões cartográficos, ainda que de uma parcela bem menor (cerca de 11 hectares).

4.4 Padronização dos produtos cartográficos gerados

As 13 representações altimétricas da superfície do trecho — 12 aerofotogramétricas e 1 da coleta GNSS/RTK — foram salvas no formato *raster* (matricial), gerando os modelos numéricos do terreno (MNT). No processo foram utilizados dois programas computacionais, sendo que as etapas iniciais (do processamento fotogramétrico) foram feitas no software METASHAPE 1.7.4 (Agisoft, 2021), onde se obteve uma nuvem densa de pontos, através da triangulação das fotos, o software Global Mapper v21.1.0 (BLUE MARBLE GEOGRAPHICS, 2020) foi usado para geração do modelo numérico da superfície (MNS) e do ORTOMOSAICO, em que a nuvem densa de pontos foi filtrada para somente os pontos que representassem o solo exposto, interpolando-os para a obtenção do MNT e, ele também foi usado para interpolação dos pontos obtidos através de levantamento GNSS para geração do respectivo MNT.

Com o uso do *Global Mapper*, foi possível agilizar a filtragem dos pontos aerofotogramétricos e facilitar a análise conjunta dos dados. Destaca-se que ele foi indispensável na geração do MNT obtido pelo levantamento dos pontos GNSS, uma vez que esse processo necessita da construção e incorporação de linhas de quebra (*breaklines*) para interpolação dos pontos, recurso necessário para que o produto gerado represente de forma mais fidedigna a superfície natural, e que não está disponível no *METASHAPE*.

O fluxo de produção realizado no programa *METASHAPE* é representado na Figura 4.11, enquanto o do programa *Global Mapper* está na Figura 4.12.

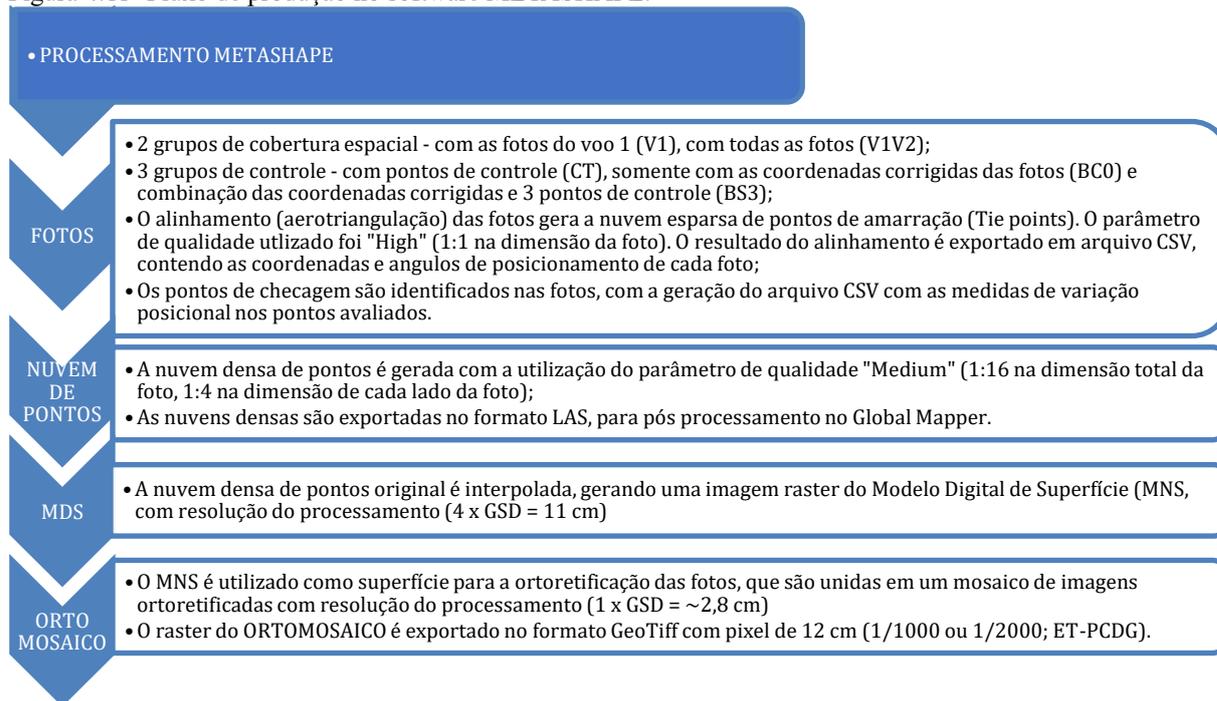
Na determinação da resolução espacial (tamanho do pixel, da célula matricial que recebe o dado altimétrico) da imagem em formato raster, foram utilizados os dados da Tabela 4.2, que relaciona os valores de acordo com as escalas cartográficas.

Tabela 4.2 – Resolução espacial de produtos cartográficos de acordo com a escala.

Resolução Espacial (m)	1:1.000		1:2.000		1:10.000	
	ORTO	MNT	ORTO	MNT	ORTO	MNT
Máx.	0,04	0,10	0,08	0,20	0,40	1,00
Típico	0,06	0,50	0,12	1,00	0,60	5,00
Mín.	0,21	2,00	0,42	4,00	2,10	20,00

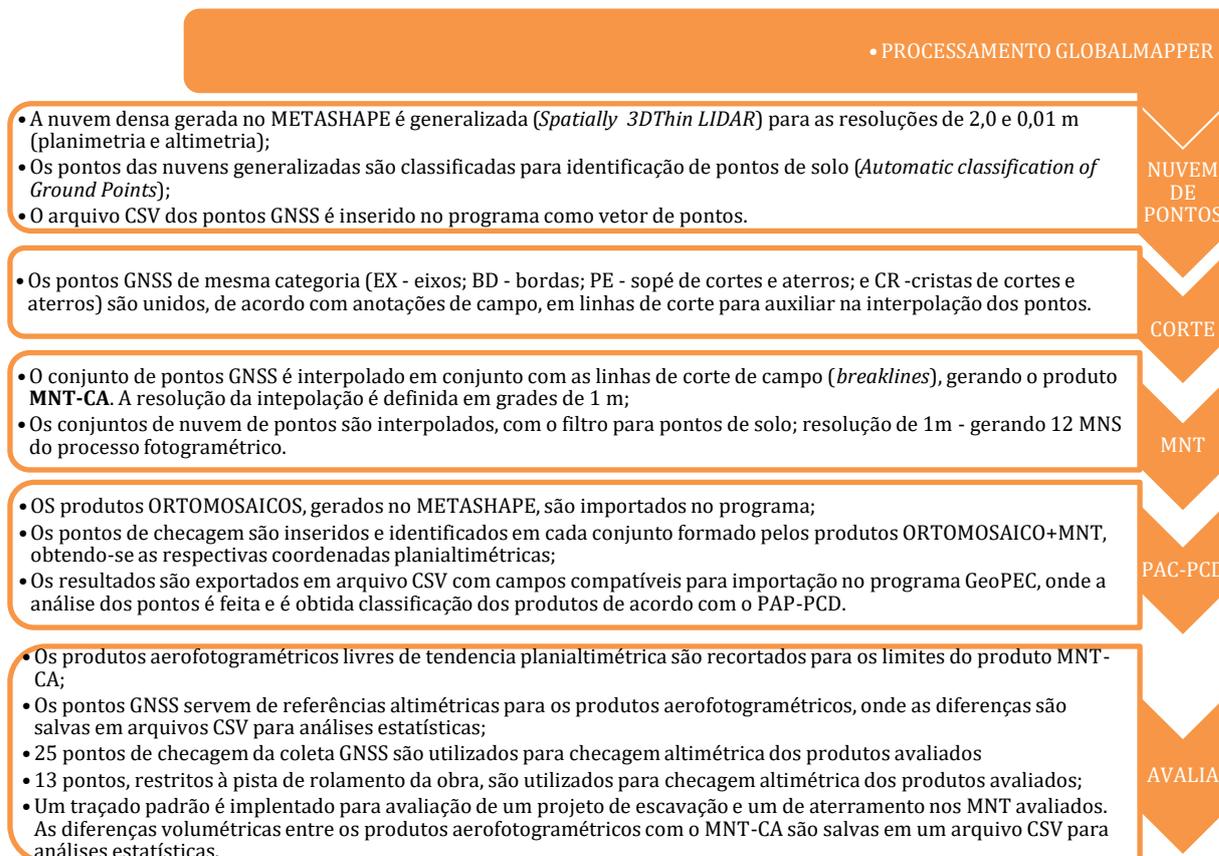
Fonte: ET-PCDG (EB, 2016).

Figura 4.11- Fluxo de produção no software METASHAPE.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 4.12- Fluxo de produção no software GLOBALMAPPER.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

As resoluções espaciais dos produtos gerados neste estudo foram padronizadas da

seguinte forma:

- a) MNS, obtido no *METASHAPE* para ser utilizado na ortorretificação das fotos, tamanho de pixel com 11 cm;
- b) ORTOMOSAICO, gerado a partir do MNS no *METASHAPE*, tamanho do pixel com 12 cm; e
- c) MNT, gerado no *Global Mapper*, tamanho do pixel com 1m.

Assim, os produtos gerados são tipicamente adequados às análises na escala 1/2000, podendo ser aproveitadas para avaliações na escala 1/1000.

Todos os produtos gerados, mantiveram o sistema de projeção utilizado nos marcos da obra do DNIT, que foram utilizados como base dos processamentos (UTM, fuso 22s, Datum SIRGAS 2000 e altitudes ortométricas, sendo obtidas através da ondulação geoidal, fornecida pelo MAPGEO2015).

4.4.1 Uso do GeoPEC para avaliação no PAP-PCD

Para auxiliar a classificação dos produtos foi utilizado o programa GeoPEC 3.5.2 (SANTOS, 2019), um “programa científico [...] voltado para avaliação da Acurácia Posicional em dados espaciais [...] em relação a três normas: (i) Decreto nº. 89.817 de 1984, em sua implementação da ET-CQDG; (ii) Inspeção Topográfica contida na NBR 13.133 de 1994 e (iii) Norma de Execução Incra/DF/02 de 2018” (SANTOS, 2018).

O GeoPEC avalia se os dados apresentam tendência (erro sistemático); se os resíduos das diferenças seguem um padrão Gaussiano (distribuição normal); se há padrão espacialmente agrupado, disperso ou aleatório para a área de cobertura (estatística do vizinho mais próximo) e se os valores apresentam *outliers* — medidas estatisticamente discrepantes (acima de três desvios padrão da média) no conjunto avaliado, excluindo-os da análise. De acordo com SANTOS (2016), as acurácias dos produtos são avaliadas nas seguintes condições — seguindo as indicações e normativas contidas em BRASIL (1984), EB (2011) e EB (2016b):

1. Planimetria:

- a. 90% dos pontos de checagem do produto têm valores de variação planimétrica (distância geométrica bidimensional entre os pontos homólogos do modelo e do campo) iguais ou menores ao valor do PEC; e

- b. os valores de dispersão da variação planimétrica menores ou iguais ao valor de RMSE de referência em relação à escala e classe avaliadas.

2. Altimetria:

a. 90% dos pontos de checagem do produto têm valores de variação altimétrica (módulo da diferença no eixo Z entre pontos homólogos do modelo e do campo) iguais ou menores ao valor do PEC; e

b. os valores de dispersão da variação altimétrica menores ou iguais ao valor de RMSE de referência em relação à escala e classe avaliadas.

O GeoPEC permite, ainda, testar produtos em escalas com qualquer denominador inteiro, maior e diferente de zero. Neste trabalho, foram investigadas as escalas 1/2000, 1/1000 e 1/500 para a planimetria, e curvas de nível de metro em metro e curvas de nível de meio metro para a altimetria, todos de acordo com as exigências das respectivas classes A do PAP-PCD.

Convém ressaltar que o plano de amostragem implantado foi planejado para distribuir os pontos de controle/checagem da pesquisa, com a utilização do padrão de 10x10 cm. Caso a amostragem considerada fosse baseada em células de 4x4 cm, a quantidade de pontos utilizados na pesquisa seria compatível com análise na escala 1/5.000

4.4.1.1 Cálculo da qualidade posicional absoluta- RMSE

A qualidade posicional absoluta é obtida “das diferenças entre as coordenadas de feições em uma fonte de maior referência e seus pontos homólogos no produto avaliado” (EB, 2016). No caso dessa pesquisa, o produto de referência é o das marcações de campo utilizadas como checagem, realizadas por posicionamento GNSS/RTK.

Calculou-se a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) como parâmetro de avaliação da qualidade posicional absoluta.

Sequência de cálculos para a obtenção do RMSE:

a) Cálculo das dispersões (d);

$$d_{eixo_i} = MD_{eixo_i} - CA_{eixo_i} \quad (2)$$

b) Cálculo das resultantes planimétricas (d_{2D}) das dispersões para cada ponto;

$$d_{2D_i} = \sqrt{d_{x_i}^2 + d_{y_i}^2} \quad (3)$$

c) Cálculo das resultantes tridimensionais (d_{3D}) das dispersões para cada ponto;

e

$$d_{3D_i} = \sqrt{d_{x_i}^2 + d_{y_i}^2 + d_{z_i}^2} \quad (4)$$

d) Cálculo do RMSE para os conjuntos de dados.

$$RMSE_{tipo} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{tipo_i})^2}{n}} \quad (5)$$

Onde: *eixo* representa os eixos X, Y e Z (paralelos aos eixos UTM-E, UTM-N e Zenital Geoidal, respectivamente); *i* representa os pontos homólogos, *MD* representa os valores obtidos nos produtos dos grupos; *CA* os valores obtidos na coleta das coordenadas das marcações de campo e *tipo* refere-se aos eixos (X, Y,Z) ou às resultantes (2D,3D) das dispersões.

4.4.1.2 Avaliação de Tendência e presença de erros grosseiros

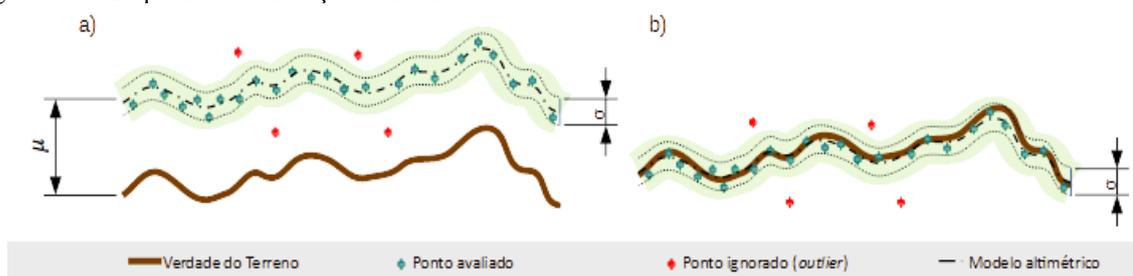
Todo processo de produção implica aceitar a presença de erros, alguns negligenciáveis (ditos próprios do processo ou randômicos), outros considerados desprezíveis (dada a finalidade do produto) e outros, ainda, que podem ser tratados (modelados ou eliminados), melhorando a qualidade do processo ou do produto. Na produção de dados geoespaciais, os erros sistemáticos e os erros grosseiros estão nessa última classificação.

Erros grosseiros são aqueles que apresentam valores maiores do que um certo limite estabelecido, devendo ser descartados da análise. Erros sistemáticos, por sua vez, são caracterizados pela presença de tendências nas componentes altimétricas ou planimétricas, indicando se tratar de dados enviesados que impedem que a discrepância observada possa ser considerada nula (hipótese indispensável para que o dado obtido represente os objetos do mundo real de forma fidedigna).

Valor acurado, nesse contexto, é entendido como aquele que tem grande proximidade com a medida real, estando livre tanto de erros grosseiros como de erros sistemáticos (GRANSHAW, 2020).

A partir da avaliação de tendência pode-se implementar procedimentos para mitigar ou eliminar o problema, como o da translação altimétrica do produto tendencioso pela média das discrepâncias medidas nos pontos de checagem (SANTOS *et al.*, 2016; CARVALHO e SILVA, 2018; POLIDORI e HAGE, 2020). A Figura 4.13 representa os elementos em um modelo altimétrico, onde μ é a média das discrepâncias (que pode ser um viés, dependendo da sua dimensão) e σ os erros randômicos.

Figura 4.13- Esquema da translação altimétrica.



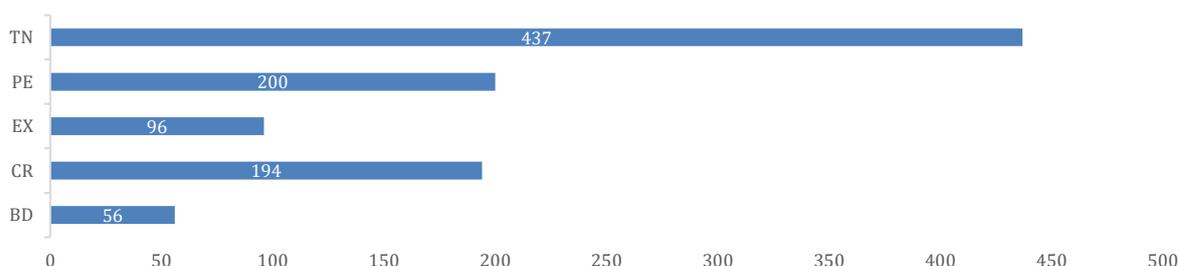
Representações: a) Dado original; b) Translação pela média das discrepâncias ($\mu = 0$).
 Fonte: adaptado de Polidori e Hage (2020).

4.4.2 Modelo numérico do terreno (MNT) dos pontos GNSS/RTK (MNT-CA)

O gráfico da Figura 4.14 traz as quantidades de pontos de acordo com os tipos coletados, onde cada tipo representa uma mudança de declividade no terreno natural. Em resumo, a coleta de campo classificou os pontos em:

- (TN) — terreno natural, 44,46% do total de pontos;
- (PE) — sopé do terreno em corte ou aterro, 20,35% do total pontos;
- (EX) — eixo da rodovia, 9,77% do total de pontos;
- (CR) — crista do terreno em corte ou aterro, 19,74% do total de pontos; e
- (BD) — bordo da rodovia, 5,70% do total de pontos.

Figura 4.14- Quantitativos dos tipos de pontos coletados em campo.



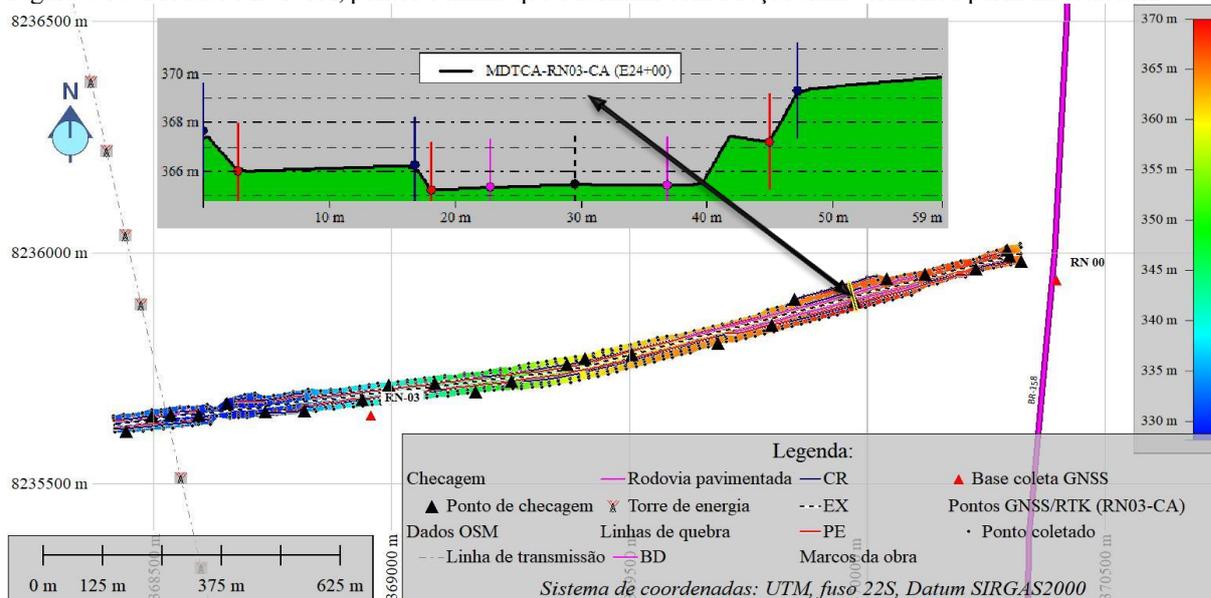
Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Os pontos dos tipos CR (crista de cortes e aterros), PE (sopés dos cortes e aterros), BD (bordo da rodovia) e EX (eixo da rodovia) foram utilizados para a geração de linhas de quebras (*breaklines*), seguindo a indicação da coleta em campo. Desse total, foram retirados 25 pontos da interpolação, para servirem de checagem do produto, sem participar da interpolação ou da confecção de linhas de corte — conferindo uma relação de 227 pontos de checagem por quilômetro quadrado.

A Figura 4.15 traz o produto MNT-CA, gerado pela interpolação dos pontos e das

linhas de quebra; a distribuição dos 25 pontos separados para a análise de aceitação do produto e uma figura do perfil na estaca E24+00, indicando a adequação do produto à situação da obra (no caso, o corte realizado no terreno natural para implantação do segmento rodoviário). O produto recobre 11,0 ha (0,11 km²) da superfície do trecho.

Figura 4.15- Produto MNT-CA, pontos e linhas que o formam com a seção transversal ndo perfil na estaca E24+00.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

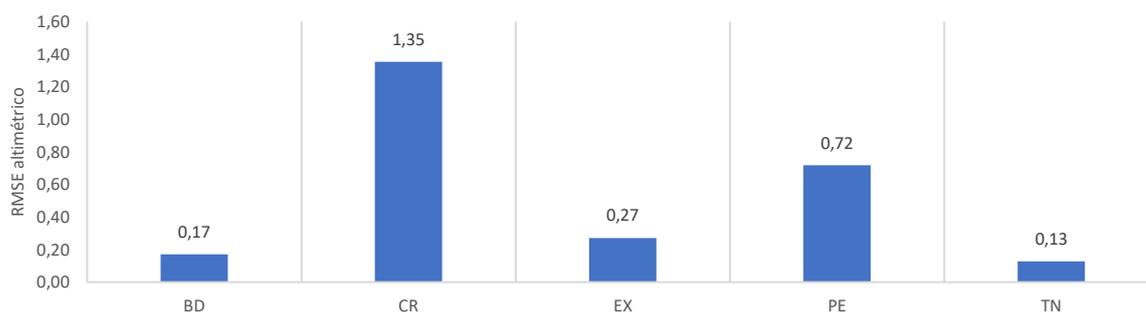
4.4.2.1 Avaliação de qualidade do MNT-CA

A distribuição dos valores de RMSE_Z pelos tipos dos 25 pontos de checagem indica que o produto tem maior confiabilidade nos pontos EX; BD e TN, enquanto os pontos PE e CR apresentam maiores valores de erro. A Figura 4.15 demonstra o gráfico com os valores de RMSE_25 para as classes dos 25 pontos separados para a análise de aceitação do produto.

Nessa configuração de pontos de checagem, o produto MNT-CA apresenta RMSE_25 geral de 0,65 m, sendo compatível com curvas de nível de 3 m de classe B, segundo o PAP-PCD.

Separando os três pontos da classe “BD” e os 3 da classe “EX”, em associação a outros 7 pontos de marcações implantadas neste estudo, obtém-se um conjunto de 13 pontos com pontos distribuídos na pista de rolamento.

Figura 4.16- RMSE_25 nas classes dos 25 pontos de checagem obtidos da coleta GNSS/RTK.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Destaca-se que considerando somente os 13 pontos da pista de rolamento, essa porção do produto MNT-CA, com cerca de 2,7 hectares (densidade de ~4,8 pontos por hectare, ou ~481 pontos por quilômetro quadrado) apresenta RMSE_13 de 0,147 m, com capacidade de gerar curvas de nível de 0,5 m de equidistância na classe B no PAP-PCD.

4.4.3 Modelos numéricos do terreno (MNT) da cobertura aerofotogramétrica

Foram processados 12 produtos MNT decorrentes do levantamento aerofotogramétrico realizado, provenientes das combinações de COBERTURA e TRATAMENTO, conforme apresenta a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Quantidades de produtos aerofotogramétricos processados.

	BC0	BS3	CT	Total Geral
V1	1	1	1	3
V1C	1	1	1	3
V1V2	1	1	1	3
V1V2C	1	1	1	3

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Após a avaliação dos produtos através do software GeoPEC, através dos respectivos pontos de checagem do processo fotogramétrico, a quantidade de produtos MNT caiu para sete. Os cinco MNT retirados da análise apresentaram tendência planimétrica. Conforme demonstra a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Quantidades de produtos aerofotogramétricos sem tendencias

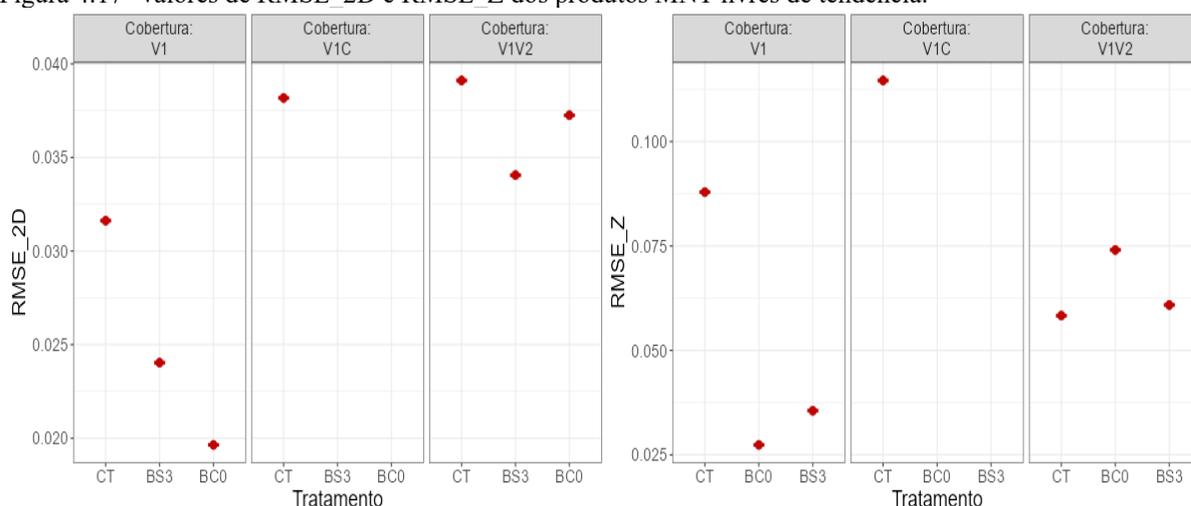
	BC0	BS3	CT	Total Geral
V1	1	1	1	3
V1C	0	0	1	1
V1V2	1	1	1	3
V1V2C	0	0	0	0

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

4.4.3.1 Avaliação de qualidade dos produtos aerofotogramétricos sem tendência

A Figura 4.17 apresenta a distribuição dos valores de RMSE_2D e RMSE_Z entre os produtos MNT livres de tendências.

Figura 4.17- Valores de RMSE_2D e RMSE_Z dos produtos MNT livres de tendência.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Todos os produtos gerados apresentaram compatibilidade com a escala 1/2000 na classe A do PAP-PCD. Na altimetria todos os produtos são compatíveis com curvas de nível de metro em metro na classe A do PAP-PCD, mesmo o produto V1C-CT, que apresentou o maior valor RMSE_Z do conjunto.

Implementou-se ainda a variável RMSE_3D para representar a dispersão média tridimensional dos produtos. Que foi calculada através da raiz quadrada da soma do quadrado de RMSE_2D com o quadrado de RMSE_Z, dada na Equação 5.

$$RMSE_{3D} = \sqrt{(RMSE_{2D})^2 + (RMSE_Z)^2} \quad (6)$$

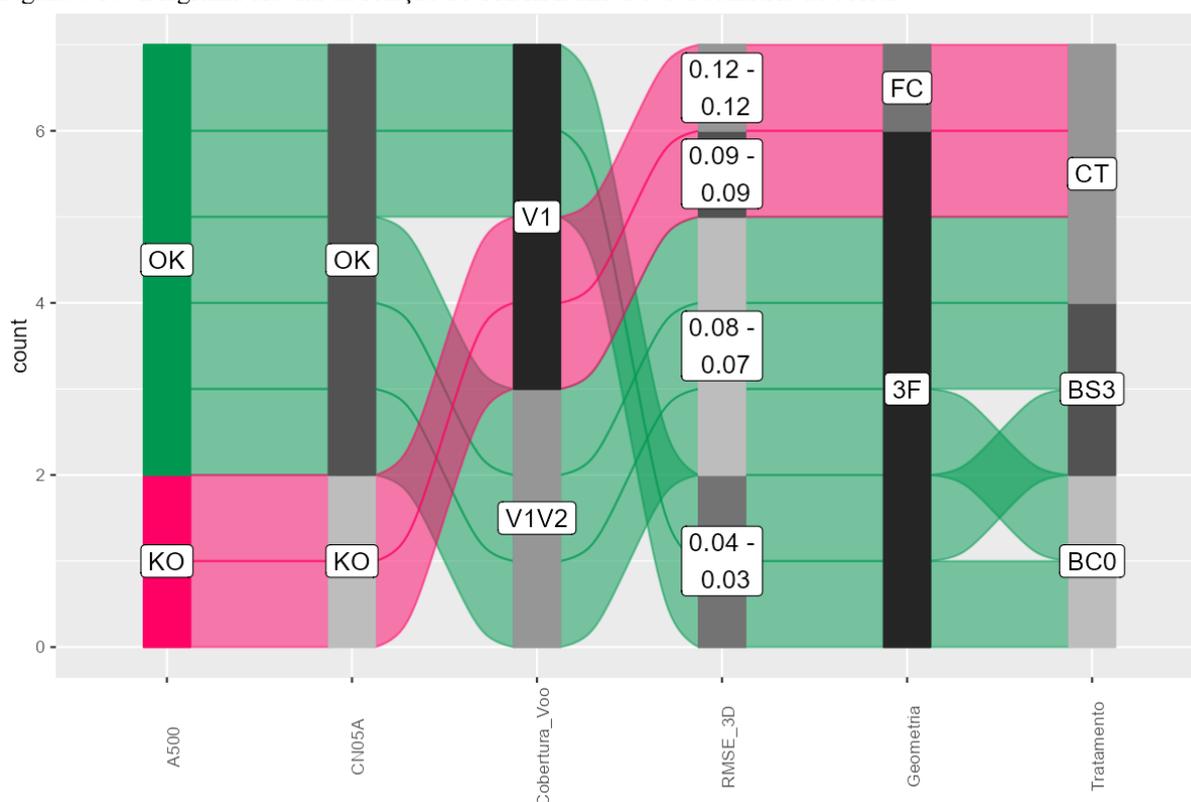
Na avaliação extrapolada — escala 1/500 e curvas de nível com equidistância de 0,5 metros — percebe-se que somente os MNT com RMSE_3D acima de 8cm não se enquadraram, conforme demonstra o diagrama aluvial da Figura 4.18.

No gráfico aluvial as indicações “OK” indicam adequação aos parâmetros exigidos pelas classes investigadas, enquanto “KO” indicam a inadequação (classe A do PAP-PCD tanto para planimetria na escala 1/500 — avaliada pela variável A500 — quanto para altimetria de curvas de nível com equidistância de meio metro — avaliada pela variável CN05A).

Convém ressaltar que o plano de amostragem implantado foi planejado para

distribuir os pontos de controle/checagem da pesquisa com a utilização do padrão de 10x10 cm, adequando a amostra para a escala 1/2000. Caso a amostragem considerada fosse baseada em células de 4x4 cm, a quantidade de pontos utilizados na pesquisa seria compatível com análise na escala 1/5.000.

Figura 4.18- Diagrama aluvial da relação de TRATAMENTO e Geometria de coleta



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

4.4.3.2 Diferenças RMSE entre a qualidade do alinhamento e dos produtos decorrentes do processo aerofotogramétrico

A pesquisa apresenta na Tabela 4.5 as diferenças entre os valores obtidos nos MNT decorrentes do processo fotogramétrico com aqueles obtidos na etapa de alinhamento (AL) das fotos, destacando os valores na diferença planimétrica (DIF_2D) e na altimétrica (DIF_Z) — as diferenças foram calculadas pela subtração os valores de AL daqueles de MNT (MNT-AL).

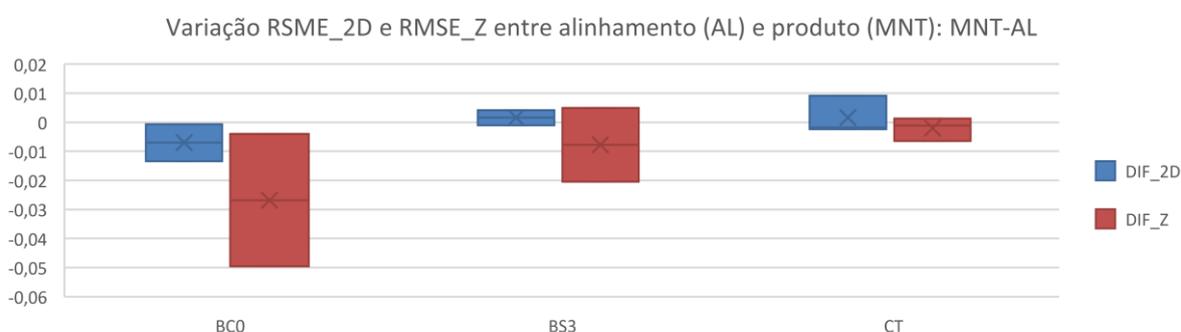
Tabela 4.5 – Valores obtidos de RMSE_2D e RMSE_Z com as marcações de solo nos produtos MNT aerofotogramétricos

ID	RMSE_2D_AL	RMSE_2D_MNT	DIF_2D	RMSE_Z_AL	RMSE_Z_MNT	DIF_Z
V1-BC0	0.033	0.0196	-0.0134	0.077	0.0274	-0.0496
V1-BS3	0.025	0.024	-0.001	0.056	0.0355	-0.0205
V1C-CT	0.04	0.0382	-0.0018	0.121	0.1146	-0.0064
V1-CT	0.034	0.0316	-0.0024	0.089	0.0879	-0.0011
V1V2-BC0	0.038	0.0373	-0.0007	0.078	0.074	-0.004
V1V2-BS3	0.03	0.0341	0.0041	0.056	0.0609	0.0049
V1V2-CT	0.03	0.0391	0.0091	0.057	0.0583	0.0013

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A Figura 4.19 traz os gráficos box-plot das diferenças entre os alinhamentos e os produtos, agrupando os dados de acordo com o TRATAMENTO.

Figura 4.19- Box-plot dos valores DIF_2D e DIF_Z entre os tipos de tratamento dos produtos MNT aerofotogramétricos.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Apesar das diferenças numéricas, as classificações dos produtos de acordo com o PAP-PCD não variaram, assim, todos os MNT avaliados foram planimetricamente compatíveis com a escala 1/1000 e altimetricamente compatível com as curvas de nível de metro em metro, de acordo com as exigências da classe A do PAP-PCD — nessa avaliação, foram utilizadas como pontos de checagem, somente as marcações implementadas em campo.

4.4.3.3 Avaliação altimétrica dos produtos aerofotogramétricos e dos pontos GNSS/RTK

Utilizando-se do conjunto de 983 pontos, coletados para a confecção do MNT-CA, representando uma amostra bastante robusta dessa porção dos produtos aerofotogramétricos (com amostragem de ~893 pontos por hectare, ou ~89.362 pontos por quilômetro quadrado), obteve-se o valor de RMSE_983 como avaliador altimétrico. Todos os produtos avaliados apresentaram compatibilidade com curvas de nível de metro em metro na classe B do PAP-PCD.

A Figura 4.20 demonstra a distribuição dos valores de RMSE_983 nas classes dos pontos GNSS ao longo dos diferentes tipos de tratamento desse estudo.

Figura 4.20- Valores RMSE ao longo dos tipos de pontos GNSS pelos tipos de tratamento.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

O teste One-Way ANOVA, em associação ao teste Post-Hoc de Tukey, indicou que não há diferenças estatisticamente significativas dos valores de RMSE_983 entre os tratamentos para as classes de pontos coletados.

Considerando somente o conjunto de 152 pontos, formado pelos 96 pontos de eixo (EX) com os 56 pontos de borda (BD) — representando a avaliação dos 2,7 hectares da pista de rolamento, com uma densidade de ~56 pontos por hectare, ou 5629 pontos por quilômetro quadrado — obteve-se o valor de RMSE_152 para avaliação altimétrica. Todos os produtos avaliados apresentaram compatibilidade com curvas de nível com equidistância de meio metro na classe A do PAP-PCD nessa porção da superfície, com média de RMSE_152 de 0,066 m.

É interessante notar que as avaliações através do RMSE_152, em comparação ao RMSE_13, assim como do RMSE_983 em comparação ao RMSE_25, não apresentaram variação de classificação dos produtos, muito provavelmente por causa dos grandes valores de densidade de pontos de checagem apresentados em cada avaliação.

4.5 Comparações entre os produtos decorrentes do processo aerofotogramétrico

4.5.1 Diferença RMSE altimétrico entre os produtos aerofotogramétricos e MNT-CA

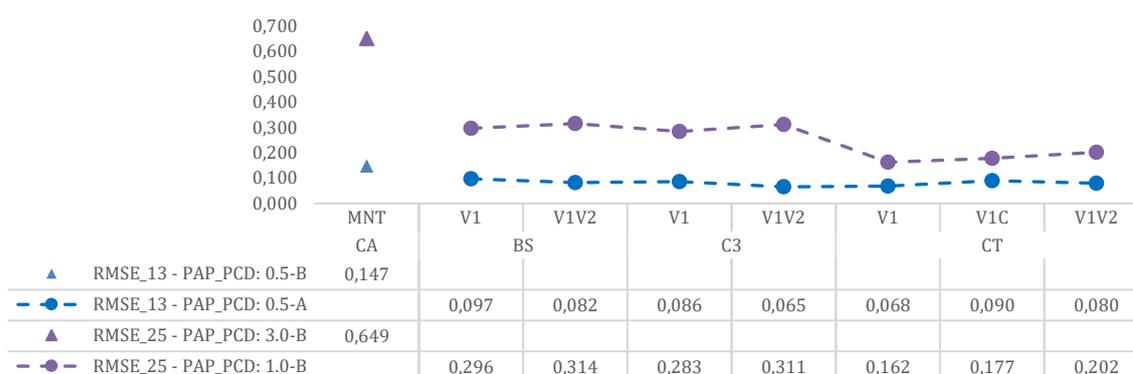
Para a comparação entre os produtos gerados, utilizaram-se dois conjuntos de pontos de checagem, que possibilitaram a comparação direta: tanto o conjunto de 25 pontos utilizados na checagem do MNT-CA (RMSE_25), quanto os 13 pontos, formado por três pontos da classe “BD” e os três da classe “EX” utilizados na checagem do MNT-CA em associação aos outros sete pontos de marcações implantadas pela pesquisa (RMSE_13).

Para o conjunto de 25 pontos obteve-se a média de RMSE_25 de 0,203 m e a classificação dos produtos aerofotogramétricos, na área de 11 hectares do produto MNT-CA,

como apropriada a curvas de nível com equidistância de metro em metro na classe B do PAP-PCD.

Já, considerando o conjunto de 13 pontos da pista de rolamento, obteve-se o RMSE_13 médio de 0,071 m e a classificação dessa porção de 2,7 hectares dos produtos aerofotogramétricos como apropriada às curvas de nível com equidistância de meio metro na classe A do PAP-PCD. A Figura 4.21 aponta os valores de RMSE_13 e RMSE_25 para os produtos gerados aerofotogramétricos livres de tendência e o produto MNT-CA.

Figura 4.21- Comparação entre os valores RMSE_13 (restrito à pista de rolamento) e RMSE_25 nos produtos gerados nesse estudo, com a indicação de suas respectivas classificações altimétricas no PAP-PCD.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

4.5.2 Avaliação de volume entre os produtos aerofotogramétricos e MNT-CA

Para a verificação das diferenças de volume na utilização dos produtos gerados, sobre um projeto de infraestrutura linear, tirou-se partido de uma linha interpretada do eixo do trecho entre as estacas E6+00 e E89+00 (1.660,00 m), com 84 vértices a cada 20 metros. A partir dessa linha base, gerou-se dois polígonos de *buffer* da linha, sendo um com 7 m (totalizando uma área de 14x1.660 m, que representou a região da pista de rolamento) e outro com 15 m (totalizando área de 30x1.660 m) entorno do eixo da obra.

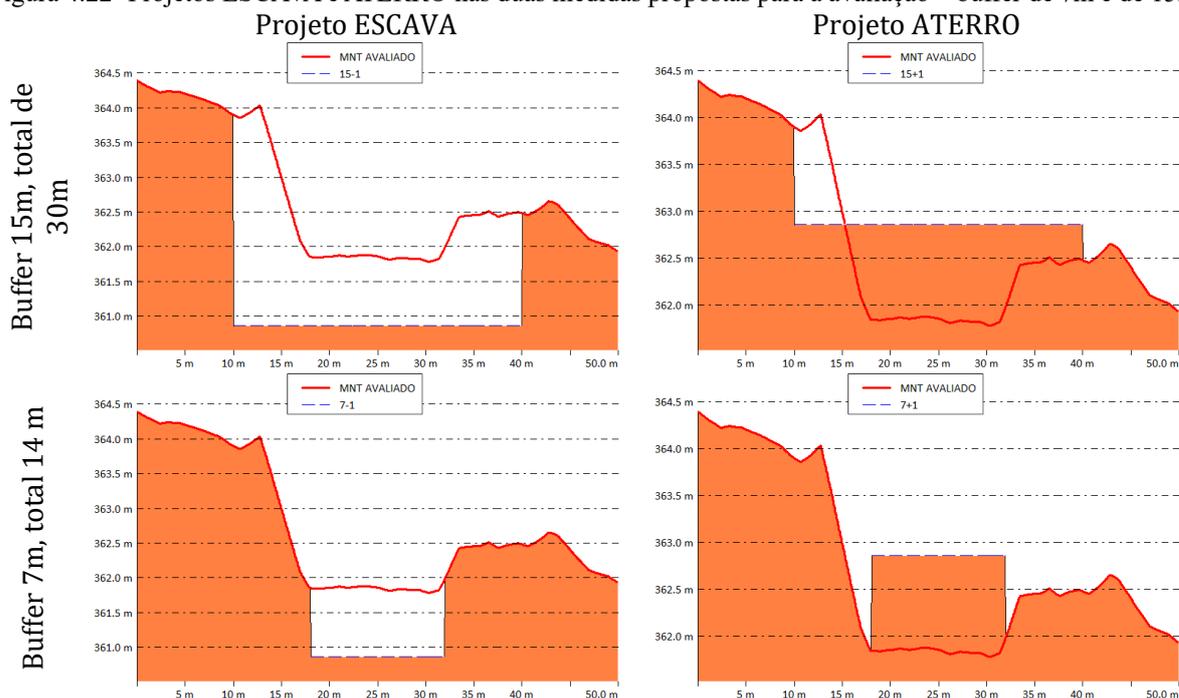
Para cada um dos 13 produtos MNT, calculou-se os volumes de movimentação de solo, causados pela implementação de dois projetos com os polígonos gerados, sendo um de aterramento — Projeto ATERRO, no qual, a partir da cota dos vértices da linha do eixo, os polígonos foram elevados em um metro — e outro de corte — Projeto ESCAVA, no qual, a partir da cota dos vértices da linha do eixo, os polígonos foram rebaixados em um metro.

A Figura 4.22 apresenta o perfil do segmento rodoviário, na estaca E80+00 com o resultante de cada um dos projetos avaliados na superfície. Em todas as superfícies o único

projeto que apresentou variação no volume líquido em relação ao volume total foi o ATERRO com polígono de 1660x30 m.

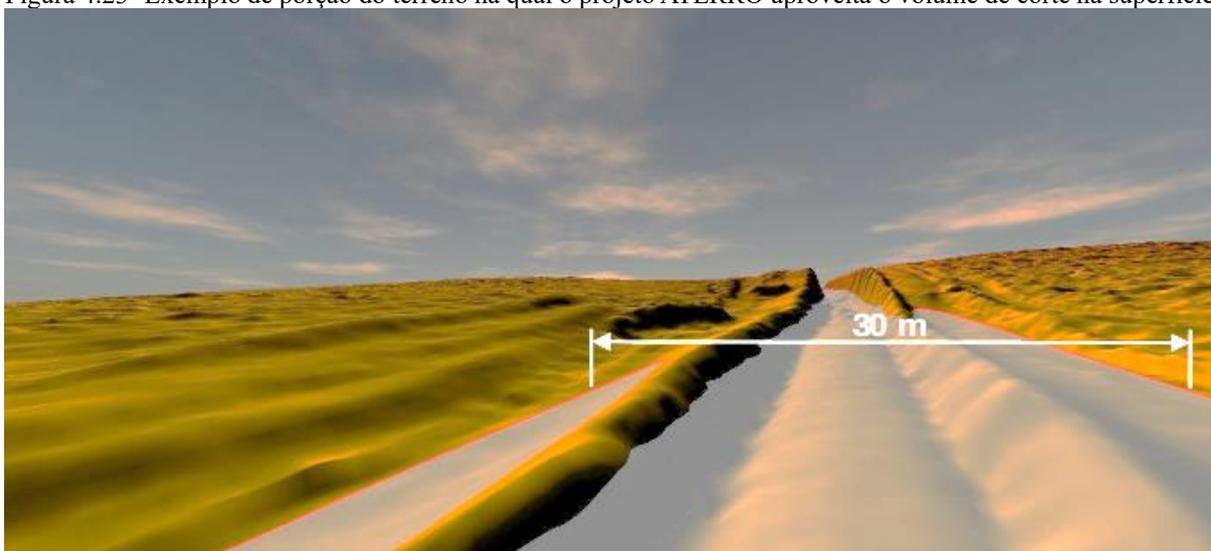
A Figura 4.23 demonstra uma região do trecho na qual o projeto ATERRO, com o polígono 1660x30 m, encontra uma porção do terreno que deve ser cortado. As comparações de volume têm o produto MNT-CA como referência. A Tabela 4.6 contém os volumes dos projetos para a superfície do produto MNT-CA.

Figura 4.22- Projetos ESCAVA e ATERRO nas duas medidas propostas para a avaliação – buffer de 7m e de 15m.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 4.23- Exemplo de porção do terreno na qual o projeto ATERRO aproveita o volume de corte na superfície.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

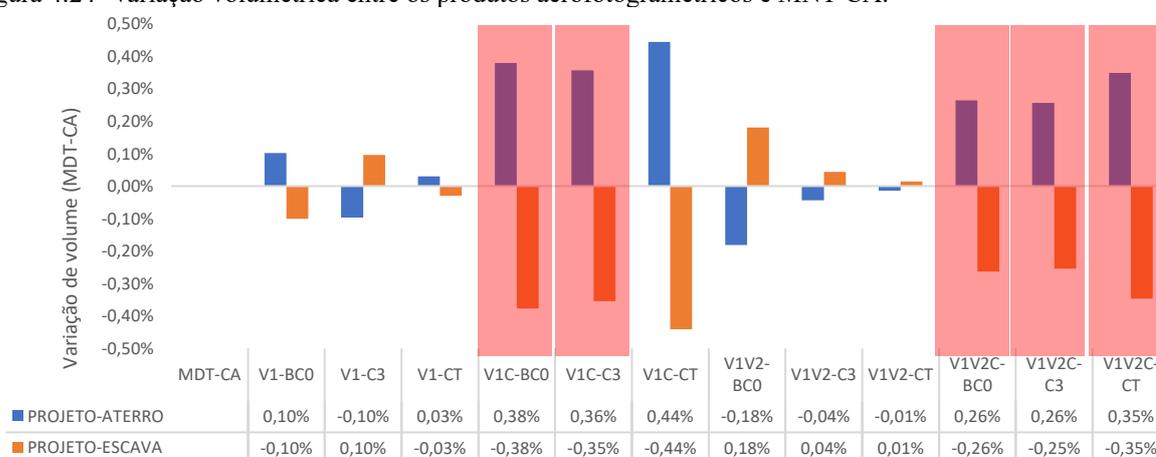
Tabela 4.6 – Volumes dos projetos no produto MNT-CA (m³).

Projeto	Volume líquido ATERRO	Volume líquido ESCAVA	Volume corte no aterro
1660x14 m	-11.579,69	11.655,91	0,00
1660x30 m	-25.400,13	24.386,60	9,54

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A Figura 4.24 aponta as variações percentuais entre os volumes dos produtos aerofotogramétricos e o produto MNT-CA, considerando os projetos ATERRO e ESCAVA para o polígono 1660x14 m (região da pista de rolamento). Destaca-se que os produtos marcados em vermelho não foram aprovados na avaliação de tendência planimétrica.

Figura 4.24- Variação volumétrica entre os produtos aerofotogramétricos e MNT-CA.

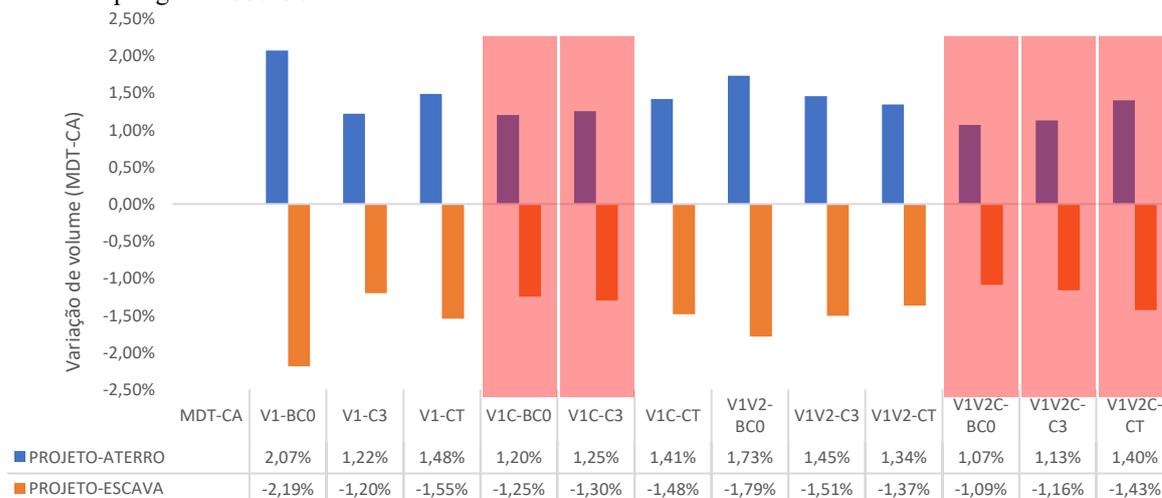


Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A Figura 4.25 aponta as variações percentuais entre os volumes dos produtos aerofotogramétricos e o produto MNT-CA, considerando os projetos ATERRO e ESCAVA para o polígono 1660x30 m. Note-se que os produtos marcados em vermelho não foram aprovados na avaliação de tendência planimétrica.

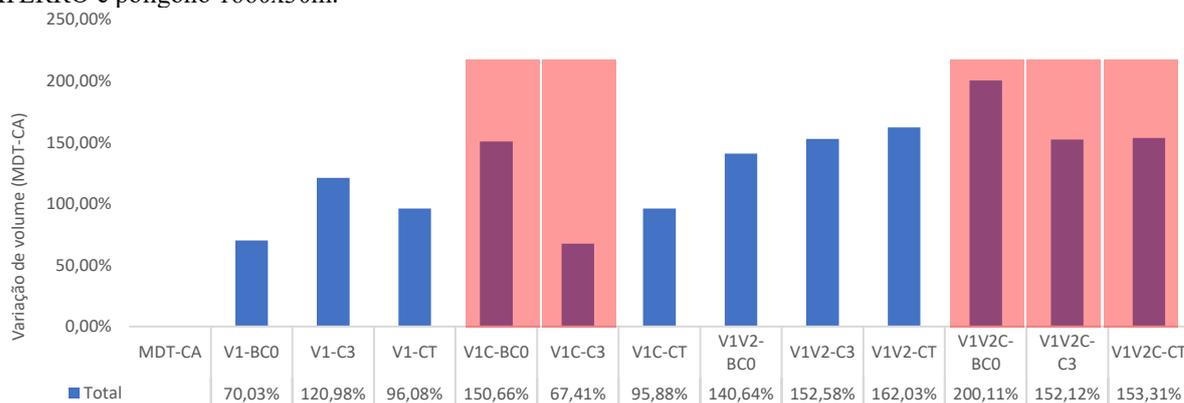
A Figura 4.26 aponta as variações percentuais entre os volumes dos produtos aerofotogramétricos e o produto MNT-CA, considerando o total de corte do projeto ATERRO para o polígono 1660x30 m. Ressalta-se que os produtos marcados em vermelho não foram aprovados na avaliação de tendência planimétrica.

Figura 4.25- Variação volumétrica entre os produtos aerofotogramétricos e MNT-CA para os projetos ATERRO e ESCAVA no polígono 1660x30m.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 4.26- Variação volumétrica entre os produtos aerofotogramétricos e MNT-CA, para os cortes no projeto ATERRO e polígono 1660x30m.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

4.5.3 Resultados das comparações

Os produtos foram avaliados na medida de qualidade posicional absoluta pela obtenção das discrepâncias posicionais planialtimétricas entre as coordenadas dos pontos obtidos em campo com seus homólogos nos diferentes produtos MNT, sendo que os aerofotogramétricos foram avaliados tanto planimétrica quanto altimetricamente e o produto da cobertura GNSS/RTK foi avaliado somente altimetricamente. Do total de 12 produtos aerofotogramétricos gerados, sete foram aprovados na avaliação de tendência. Já os cinco reprovados apresentaram tendência planimétrica — todos esses com a geometria de coleta por faixa única, central ao trecho.

Os resultados apontaram que o produto MNT-CA, obtido pela interpolação dos pontos GNSS/RTK, apresenta, na média, valor da raiz quadrada do erro médio altimétrico

(RMSE) 1,6x maior que os produtos aerofotogramétricos livres de tendência.

Com 25 pontos distribuídos ao longo de toda a superfície de MNT-CA, o produto é compatível com curvas de nível de 3 m, enquanto os produtos aerofotogramétricos, com o mesmo conjunto de avaliação, são compatíveis com curvas de nível de metro em metro, ambos de acordo com a classe B do PAP-PCD.

Na avaliação restrita à pista de rolamento da obra, feita por 13 pontos, ambos os produtos são compatíveis com curvas de nível com meio metro de equidistância, sendo MNT-CA compatível com a classe B e os produtos aerofotogramétricos com a classe A do PAP-PCD.

A partir de um traçado da linha de eixo da obra, de 1.660,00 m e com vértices a cada 20 m, gerou-se dois polígonos com *buffer* ao longo do eixo — um com 7 m, obtendo um polígono de 1660x14m, e outro com 15m, gerando um polígono de 1660x30m. A partir de cada polígono, obteve-se a volumetria de se escavar a um metro ou de se aterrar um metro das superfícies geradas, sempre partindo das cotas da linha central apoiadas sobre as superfícies avaliadas.

A comparação realizada indicou que a diferença volumétrica de movimentação líquida de solo entre os produtos aerofotogramétricos e o produto MNT-CA na porção da faixa de rolamento (avaliada pelo polígono 1660x14 m) é significativamente menor (cerca de um quarto) daquela apresentada na avaliação do polígono 1661x30m. Dos projetos gerados, o único que causa tanto corte quanto aterro é o projeto de aterramento com o polígono 166x30m. A comparação de volume dessa área de corte nas superfícies aerofotogramétricas é a que apresenta as maiores variações percentuais com relação ao produto MNT-CA, com média acima de 120% — mas chegando a até 200%.

Essas análises parecem indicar que há pouca variação volumétrica na porção da superfície que tem a melhor qualidade (menor RMSE) e a topografia menos movimentada (pois se trata da região da pista de rolamento). E que as maiores variações de volume se dão nas comparações de projetos que apresentam uma relação mais intrincada com o terreno, apresentando tanto cortes quanto aterros.

4.6 Discussão dos resultados

Esta investigação comparou um modelo numérico do terreno (MNT) obtido através do perfilamento da superfície de um segmento rodoviário, em obras, por meio de posicionamento GNSS com correção RTK, a doze outros MNT obtidos através de uma mesma cobertura aerofotogramétrica, coincidente ao levantamento GNSS/RTK, em que cada produto

foi resultado da combinação das formas do arranjo geométrico da coleta (registrado na variável COBERTURA, com quatro níveis), com os meios de correção do posicionamento dos produtos (registrado na variável TRATAMENTO, com três níveis), dois parâmetros que influenciam tanto na qualidade do produto decorrente quanto na produtividade da atividade.

Agüera-Veja *et al.* afirmaram que a acurácia altimétrica de um MDE gerado através de nuvens densas de pontos (fotogrametria ARP e LIDAR terrestre, no artigo) é “dependente de alguns fatores, como a densidade e distribuição da nuvem de pontos, da resolução da grade e do tipo de interpolador utilizado” (2020, p. 3) tendo sido, também, identificada a influência da morfologia do terreno em alguns trabalhos revisados pelos autores.

Os produtos aerofotogramétricos apresentam densidade média de pontos cerca de 700 vezes superior ao levantamento GNSS/RTK: 6,2 pontos por m², contra os ~89 pontos por hectare (0,009 pontos por m²), ressaltando a maior quantidade de informações coletadas pelo processo fotogramétrico na geração dos MNT.

Maune & Nayegandhi comentam que “o detalhe da superfície presente nos produtos finais dependerá de vários fatores, incluindo a resolução dos pixels, densidade de pontos ou resolução dos dados de elevação da fonte e o tipo de terreno e cobertura da área sendo mapeada” (2018, p. 531).

A qualidade dos produtos aerofotogramétricos se mostrou melhor do que a do produto MNT-CA em todas as análises — seja de qualidade posicional, seja na densidade de pontos. Assim, pode-se afirmar que a representação daqueles é mais fidedigna à realidade do terreno natural do que este, tanto ao longo de toda a superfície quanto na porção da pista de rolamento, ainda que nessa porção a diferença se mostre baixa.

4.7 Conclusões

Com relação às comparações entre os produtos MNT gerados por aerofotogrametria, destaca-se que a máxima otimização do processo, com coleta sem pontos de controle e por uma única faixa de voo, central ao trecho, não passou na avaliação de tendência planimétrica, sendo necessária a implementação de alguma forma de correção para o seu efetivo uso. O conjunto de tratamento que manteve os melhores resultados, ainda que sem mudanças na classificação PAP-PCD, foi a que tira partido de pontos de controle distribuídos ao longo da área recoberta, sem a implementação do GD/PPK.

A utilização da cobertura aerofotogramétrica como base para uma coleta complementar, direcionada à caracterização de certos elementos topográficos — detalhando os

traçados dos talwegues, por exemplo, e executada por GNSS ou por estação total — pode conferir ainda maior qualidade ao produto final, incluindo linhas de corte (*breaklines*) nas porções do terreno, onde a obtenção de pontos fotogramétricos seja de difícil solução.

5 CONCLUSÕES

Esta tese apresenta, ao longo de três capítulos-artigos, as implicações para que projetos executivos rodoviários, do potencial uso de produtos cartográficos decorrentes da utilização da técnica de georreferenciamento direto (GD) de fotos através da correção pós-processada (PPK) da posição da aeronave remotamente pilotada (ARP) em cobertura de elementos lineares de infraestrutura sob a geometria de coleta por voo em corredores, defendendo a tese de que tais produtos atendem aos requisitos impostos pela legislação vigente, o que os qualifica para tal finalidade.

No primeiro capítulo-artigo (Capítulo 2), discutiu-se a amplitude de áreas do conhecimento e produtos geoespaciais que podem ser obtidos pela utilização de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP). O capítulo foi resultado de uma revisão bibliográfica sistemática de trabalhos nacionais acerca da coleta de imagens via ARP para a geração de dados geoespaciais por fluxos de Fotogrametria e/ou de Sensoriamento Remoto, focando na compreensão dos produtos e serviços gerados, bem como nos métodos e equipamentos utilizados pelos diversos autores.

Os resultados da discussão indicaram que o assunto tratado na presente tese apresentava pouca produção acadêmica, uma vez que a totalidade dos estudos investigados apresentou resultados de dados coletados em voos do tipo grade, que tem uma estrutura geométrica bem mais robusta que a de corredor. Adicionalmente, ressaltou-se as obrigações legais às quais os produtores de dados geoespaciais por coleta ARP estão sujeitos, vinculadas aos órgãos quatro reguladores da atividade no país: a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), o Ministério da Defesa (MD) e o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). Destacam-se os esforços de atualização das bases legais e de sistemas que cada órgão tem implementado para viabilizar a utilização segura e viável das ARP nos vários tipos de atividades, onde que estão sendo empregadas — incluindo a aerofotogrametria.

O segundo capítulo-artigo (Capítulo 3) discutiu a obtenção de dados aerofotogramétricos por meio de voos em geometria de corredor, com linha única e uso de GD/PPK sem nenhum ponto de controle (combinação que representa a máxima eficiência de coleta em fotos por área coberta com a mínima implementação de controle em campo) é capaz de gerar dados compatíveis com as exigências do DNIT.

A metodologia de comparação utilizou as qualidades posicionais absolutas e a avaliação das propensões na geração de dados tendenciosos (presença de erro sistemático) de

seis tipos de arranjos de cobertura (utilizando somente as fotos da linha central ou das três linhas entre três combinações dos voos realizados) combinados a quatro tipos de controle fotogramétrico (somente por GD/PPK ou com a combinação deste com um ou três pontos de controle em campo versus a ausência de GD/PPK e distribuição de pontos de controle ao longo do trecho). No esquema de avaliação foram gerados 24 grupos de combinações, com a implementação de uma série de Monte Carlo para abastecer cada grupo com 100 amostras.

Os resultados assinalaram que a forma mais segura para geração de dados aerofotogramétricos, em coberturas lineares, é pela utilização de pontos de controle ao longo do trecho sem GD/PPK, pois as chances de se alcançar dados tendenciosos são diminutas, além de se obter dados com os menores valores de erro quadrático médio (RMSE). Para o caso de se optar pelo uso de GD/PPK, os resultados indicaram que a estratégia de se implementar três pontos de controle, reduz a possibilidade de se obter tendência altimétrica nos dados, sendo este o procedimento mais indicado. Já a implementação de máxima eficiência (processamento de fotos somente da linha central e sem pontos de controle), se mostrou pouco confiável, necessitando de métodos que eliminem a tendência planimétrica nos resultados.

Essas verificações de qualidade dizem respeito à produção das nuvens de pontos pela utilização do software METASHAPE, um dos programas mais difundidos no processamento de dados coletados via ARP. A qualidade verificada é tanto da nuvem esparsa (obtida pela triangulação das fotos, via o algoritmo “Structure from Motion” - SfM) quanto da nuvem densa (obtida pelo “Multiview Stereopsis” - MVS); produtos geoespaciais que podem ser diretamente integrados ao fluxo de trabalho ou utilizados como base para a obtenção de modelos de superfícies, sendo utilizados para as mais variadas finalidades onde o processo aerofotogramétrico por ARP é realizado.

No terceiro e último capítulo-artigo (Capítulo 4) discutiu-se quais são as diferenças entre se obter um modelo numérico do terreno (MNT) através do perfilamento da superfície com uso de receptor GNSS, com correção RTK (método habitualmente utilizado) ou com as nuvens de pontos obtidos pelo processo aerofotogramétrico.

Os resultados demonstraram claramente que os produtos aerofotogramétricos representam de forma bem mais detalhada a superfície (a densidade da nuvem de pontos aerofotogramétrica é ~700 vezes maior que a da cobertura GNSS/RTK) e de forma mais confiável (todos os produtos aerofotogramétricos avaliados apresentaram valores de RMSE menores que o produto gerado a partir da coleta GNSS/RTK). Adicionalmente, evidenciou-se pelos resultados obtidos que os produtos gerados pelo processamento das fotos da linha central mantiveram o problema de tendência planimétrica, apresentada nas nuvens de pontos e que as

avaliações de qualidade, feitas pelo programa computacional GeoPEC, não divergiram entre as etapas de alinhamento das fotos (obtidos na avaliação das nuvens de pontos) e de obtenção do produto final.

Destaca-se que são dois os maiores desafios para implementação do processo fotogramétrico, identificados pelo autor ao longo da pesquisa: um de natureza técnica, que é a filtragem dos pontos de solo — pois depende de uma série de combinações do processo, incluindo a qualidade da incidência de luz solar; a quantidade de sobreposição das fotos; as características do terreno e dos elementos sobre este (o trato de imagens de regiões com vegetação rasteira encontra dificuldades diferentes daquele de regiões com vegetação de porte alto, ou de regiões com edificações...) e outros. O segundo desafio é de natureza cultural/operacional do processo de geração do modelo do terreno, que hoje é baseado em uma coleta de campo que consome muito tempo e esforço da equipe e que passaria a demandar uma análise mais apurada em escritório do produto obtido, incluindo a necessidade de capacitação em novos softwares; equipamentos de coleta e regularização legal perante os órgãos de fiscalização e controle da atividade de aerofotogrametria via ARP.

Aquelas atividades da Engenharia Rodoviária que lidam com a avaliação direta do solo exposto (como o acompanhamento da movimentação de solo nos cortes e aterros durante as obras, por exemplo) ou de verificação da realidade do pavimento rodoviário (sem os veículos) têm vantagens na implementação da cobertura aerofotogramétrica por ARP em seus fluxos de trabalho, pois lidam com superfícies que não necessitam de filtragem na nuvem de pontos. Nas situações onde a filtragem se faz necessária (como nos levantamentos para estudo de traçado ou para verificação da interferência de cursos d'água no traçado definido), recomenda-se a utilização da cobertura aerofotogramétrica em conjunto com o levantamento de detalhes por topografia convencional ou por levantamentos GNSS/RTK, implementando uma metodologia que permita a obtenção de linhas de quebra aderentes às nuvens de pontos aerofotogramétricas, melhorando assim a capacidade de representação da superfície natural.

A partir dos resultados da tese não foi possível confirmar a hipótese de que os produtos e gerados por aerofotogrametria ARP em coletas de corredores e com implementação de GD/PPK não são compatíveis com os requisitos de qualidade posicional para utilização em projetos executivos da Engenharia Rodoviária. Assim, aceita-se a hipótese alternativa e conclui-se que o processo de geração de dados geospaciais pelo método apresentado é condizente com o estabelecido na publicação IPR-726 (DNIT, 2006) para utilização em projetos rodoviários, pois os produtos apresentaram qualidade planimétrica compatível com a escala 1/2.000 e altimétrica com curvas de nível de 1 metro, ambos de acordo com as respectivas exigências da

classe A no Padrão de Exatidão Cartográfico (BRASIL, 1984). Ressalva-se, todavia, que há a necessidade de uma reedição desse conjunto de normativas, em especial as do DNIT, para incluir as coletas via ARP, no rol de tecnologias utilizáveis para a coleta de dados para projetos, incluindo aí normatização dos métodos de controle, com a definição de padrões espaciais de checagem para os produtos apropriados aos projetos executivos da Engenharia Rodoviária. Neste caso, este estudo poderia ser o ponto de partida para essa readequação normativa.

Para estudos futuros recomenda-se que sejam avaliadas as aderências entre os produtos aerofotogramétricos e os levantamentos LIDAR, obtidos por ARP. O LIDAR é uma tecnologia de perfilamento laser das superfícies que vem se tornando cada vez mais acessível e que pode resultar na obtenção de um modelo de terreno mais detalhado, demandando avaliação.

BIBLIOGRAFIA

ABDULLAH, Qassim. MAPPING MATTERS: your questions answered. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing** V. 86, N. 12, dez 2020. DOI: 10.14358/PERS.86.12.721

AGISOFT. **Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition**, v.1.7.4. 2021. Disponível em: <https://www.agisoft.com/downloads/user-manuals/>. Acesso em: 08/03/2022.

AGÜERA-VEJA, F.; AGÜERA-PUNTAS, M.; MARTÍNEZ-CARRICONDO, P.; MANCINI, F. & CARVAJAL, F. Effects of point cloud density, interpolation method and grid size on derived Digital Terrain Model accuracy at micro topography level. **International Journal of Remote Sensing**. 2020. DOI:10.1080/01431161.2020.1771788

ALMEIDA, Igor de Carvalho. **Estudos sobre o uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para mapeamento aéreo com fins de elaboração de projetos viários**. 2014. Projeto final de curso (Graduação em Engenharia Civil) — Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Católica de Pernambuco. 2014

ALVES JR., Leomar Rufino. **Análise de produtos cartográficos obtidos com câmera digital não métrica acoplada a um veículo aéreo não tribulado em áreas urbanas e rurais no estado de Goiás**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás. 2015.

ARIZA-LÓPEZ, Francisco Javier; GORDO-ATKINSON, Alan David. Analysis of some positional accuracy assessment methodologies. **J. Surv. Eng.** 2008. DOI: 10.1061/ASCE0733-94532008134:245

ARIZA-LÓPEZ, Francisco Javier; RODRÍGUEZ-AVI, J. Using International Standards to Control the Positional Quality of Spatial Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. 2015. DOI:10.14358/PERS.81.8.657

ASPRS. The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 979-984, julho, 1989. Disponível em: https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1989journal/jul/1989_jul_979-984.pdf, Acesso em: 10/11/2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT, NBR 13133**: Execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro. 1994.

BRASIL. **Decreto nº 89.817 de 20 de Julho de 1984**. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional.

CARVALHO, João A. Batista; SILVA, Daniel Carneiro. Métodos para avaliação da acurácia posicional altimétrica no Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**. V. 70, n.2. 2018.

COMANDO DA AERONÁUTICA; DEPARTAMENTO DE CONTROLE AÉREO. **Tráfego aéreo**: Sistemas de aeronaves remotamente pilotadas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro — ICA 100-40/2016. Brasília, 2017. Disponível em: <https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=4510>. Acesso em: 16/11/2017.

CÔRTEZ, J. B. R. 1998. **O uso de fotografias aéreas de pequeno formato digitalizadas em mapeamento topográfico planimétrico**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas — Setor de Ciências da Terra. Universidade Federal do Paraná.

CÔRTEZ, J. B. R. 2010. **Análise da estabilidade de câmaras digitais de baixo custo com diferentes métodos de calibração**. Tese de doutorado. (Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

COSTA, Glauber Carvalho. 2008. **Análise dos produtos obtidos com aerolevantamentos utilizando câmeras digitais não-métricas para elaboração de anteprojetos rodoviários**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) — Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.

COSTA, Sônia Maria Alves. **RBM e RBMC-IP: Rede GNSS ativa como apoio aos levantamentos de campo**. São Paulo, 2014. Disponível em: https://mundogeoconnect.com/2014/arquivos/palestras/8_mai_c-sonia-costa.pdf. Acesso em: 10/11/2019.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, DNIT. **Diretrizes Básicas para Estudos e Projetos Rodoviários: escopos básicos / instruções de serviços**. Publicação IPR-726. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, DNIT. **Instrução de serviço No 03, de 31 de Janeiro de 2018**. Estabelece as diretrizes para o levantamento de bases ou estações de referência materializadas em campo, através de marcos geodésicos implantados, bem como de pontos de controle foto-identificáveis e demais pontos de campo obtidos através da utilização de métodos e tecnologias de posicionamento geodésico por satélites GNSS. Também estabelece diretrizes a respeito dos formatos de entrega dos produtos resultantes dessas atividades de levantamento. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/instrucoes-normativas/instrucoes-de-servicos/2018/instrucao-de-servico-03-de-31-01-2018-colegiada-pontos-de-controle-fotoidentificaveis.pdf>. Acesso em: 30/05/2018.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Elaboração dos projetos básico e executivo e execução das obras de implantação, construção e pavimentação do contorno de Aragarças/GO na rodovia BR-070/GO**. VOLUME 03C — Memória justificativa do projeto geométrico. 2018a.

EB - EXÉRCITO Brasileiro. **Norma da Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais: ET-ADGV** — PRC-GE/E 3001/09 — 2ª Edição. Brasília, 2011.

EB - EXÉRCITO BRASILEIRO. **Norma para Especificação Técnica para Produtos de Conjunto de Dados Geoespaciais: ET-PCDG** — EB80-N-72.001 — 2ª Edição. Brasília, 2016.

FERREIRA, Alexandre Moreno Richwin. **Avaliação de câmara de pequeno formato transportada por veículo aéreo não tripulado — VANT, para uso em aerolevantamentos**.

2014. Dissertação (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 2014.

FERRER-GONZÁLEZ, Ezequiel; AGUERA-VEGA, Francisco; CARVAJAL-RAMIREZ, Fernando; MARTINEZ-CARRICONDO, Patricio. UAV Photogrammetry Accuracy Assessment for Corridor Mapping Based on the Number and Distribution of Ground Control Points. **Remote Sensing**. v.12. 2020. DOI: 10.3390/rs12152447

GABRLIK, Petr; COUR-HARBO, Anders; KALVODOVA, Petra; ZALUD, Ludek; JANATA, Premysl. Calibration and accuracy assessment in a direct georeferencing system for UAS photogrammetry. **International Journal of Remote Sensing**. v. 39, p. 4931-4959. 2018. DOI: 10.1080/01431161.2018.1434331

GALERA MONICO, João Francisco; DAL PÓZ, Aluir Porfírio; GALO, Maurício; CARVALHO DOS SANTOS, Marcelo; CASTRO DE OLIVEIRA, Leonardo. Acurácia e precisão: Revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**. V.15, p. 469-483. ISSN: 1413-4853. 2009. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=393937709010>. Acesso em: 06/03/2022.

GIANG, Nguyen T.; MULLER, Jean-Michaël; RUPNIK, Ewelina; THOM, Christian; DESEILLIGNY, Marc P. Second Iteration of Photogrammetric Processing to Refine Image Orientation with Improved Tie-Points †. **Sensors**, v.18. 2018. DOI: 10.3390/s18072150.

GRANSHAW, S. I. **Photogrammetric terminology**: fourth edition. The Photogrammetric Record, 35(170), 143—288. 2020. DOI:10.1111/phor.12314

HOSMER, David W.; LEMESHOW, Stanley. **Applied Logistic Regression**. [s. l.] John Wiley & Sons, 2. ed. 2000. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471722146.ch5>

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Avaliação da qualidade de dados geospaciais**. IBGE, Coordenação de Cartografia. — 2. Ed. — Rio de Janeiro : IBGE, 2019 112p. : il. - (Manuais técnicos em geociências, ISSN 0103-9598; n. 13) ISBN 978-85-240-4500-4

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **RECOMENDAÇÕES PARA LEVANTAMENTOS RELATIVOS ESTÁTICOS — GPS**. Abril de 2008. Disponível em: http://www.inde.gov.br/images/inde/recom_gps_internet.pdf . Acesso em: 04/09/2018.

INCRA — INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA. **Manual técnico de posicionamento: georreferenciamento de imóveis rurais**: 1ª Edição. 2013. Disponível em http://www.incra.gov.br/sites/default/files/uploads/estrutura-fundiaria/regularizacao-fundiaria/certificacao-de-imoveis-rurais/manual_tecnico_de_posicionamento_1_edicao.pdf. Acesso em: 26/05/2018.

INCRA — INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA. **Norma de execução INCRA/DF/ No. 02**: 19 de Fevereiro de 2018. Estabelece critérios para aplicação e avaliação de produtos gerados a partir de aerofotogrametria para determinação de coordenadas de vértices definidores de limites de imóveis rurais em atendimento ao parágrafo

3º do artigo 176 da Lei No. 6.015. Disponível em <<http://mundogeo.com/wp-content/uploads/2018/02/NE-IN CRA-DF-N-02.pdf>>. Acesso em: 26/05/2018.

ISO - ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE NORMALIZAÇÃO. ISO 2859-1:1999. **Sampling procedures for inspection by attributes** — Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection. 87p. 1999.

JAMES, M. R., ROBSON, S. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. **Earth Surface Processes and Landforms** v. 39, p. 1413—1420. 2014. DOI: 10.1002/esp.3609

JAMES, M. R., ROBSON, S., OLEIRE-OLTMANN, S., NIETHAMMER, U. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. **Geomorphology**, v. 280, p. 51-66. 2016. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.11.021

JAMES, M. R., ROBSON, S., SMITH, M. W. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 42, p. 1769—1788. 2017. DOI: 10.1002/esp.4125

JAVADNEJAD, Farid; SLOCUM, Richard K.; GILLINS, Daniel T.; OLSEN, Michael J.; PARRISH, Christopher E. Dense Point Cloud Quality Factor as Proxy for Accuracy Assessment of Image-Based 3D Reconstruction. **Journal of Surveying Engineering**, v.147. 2021. DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000333.

JIANG, San; JIANG, Cheng; JIANG, Wanshou. Efficient structure from motion for large-scale UAV images: A review and a comparison of SfM tools. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 167, p. 230-251. 2020. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.04.016

KERLE, Norman; NEX, Francesco; GERKE, Markus; DUARTE, Diogo; VETRIVEL, Anand. UAV-Based Structural Damage Mapping: A Review. **ISPRS International Journal of Geo-Information**. v. 9. 2019. DOI: 10.3390/ijgi9010014

KOMAZAKI, J.M *et al.* Avaliação da qualidade geométrica de modelos digitais do terreno obtidos a partir de imagens adquiridas com VANT. *In: XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia*, 6-9 de Novembro de 2017, Escola Naval, Rio de Janeiro, Brasil. **Anais**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/321013061_Avaliacao_da_qualidade_geometrica_de_modelos_digitais_do_terraino_obtidos_a_partir_de_imagens_a_dquiridas_com_VANT. Acesso em: 16/11/2017.

LOBO, F.; FERREIRA, M. E. .; UCHOA, C. .; COSTA, J. V. Uso de Plataformas Aéreas Não Tripuladas no Brasil — um Panorama de Dez Anos (2008-2018) de Publicações Acadêmicas. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 72, p. 785-806, 2020. DOI: 10.14393/rbcv72nespecial50anos-56503. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/56503>. Acesso em: 20 mar. 2022.

LONGHITANO, George Alfredo. **VANTS para sensoriamento remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes, Geoprocessamento) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2010.

LOSÈ, Lorenzo T.; CHIABRANDO, Filiberto; TONOLO, Fabio G. Boosting the Timeliness of UAV Large Scale Mapping. Direct Georeferencing Approaches: Operational Strategies and Best Practices. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9. 2020. DOI: 10.3390/ijgi9100578

LOUREIRO, Sérgio Adriano; NOLETTO, Ana Paula Reis; SANTOS, Lilian da Silva *et al.* 2016. O uso de método de revisão sistemática da literatura na pesquisa em logística, transportes e cadeia de suprimentos. **Transportes** V.24, n.1, p. 95-106. Disponível em <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/919/591>. Acesso em: 14/05/2018.

LUZ, Cristhyano Cavali. **Avaliação da exatidão absoluta de ortofoto obtida por meio de dados brutos oriundos de veículos aéreos não tripulados (SISVANT)**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) — Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná. 2015.

MARTINEZ Jhonattan G.; ALBEAINO Gilles; GHEISARI Masoud; VOLKMANN Walter; ALARCÓN Luis F. UAS Point Cloud Accuracy Assessment Using Structure from Motion—Based Photogrammetry and PPK Georeferencing Technique for Building Surveying Applications. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 35. 2021 DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000936

MATESE Alessandro, TOSCANO, Piero, GENNARO, Salvatore, GENESIO, Lorenzo *et al.* 2015. Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture . **Remote sensing journal**. N7, p. 2971-2990; DOI:10.3390/rs70302971. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2072-4292/7/3/2971/htm>. Acesso em: 02/05/2018.

MAUNE, David F & NAYEGANDHI, Amar (ed.). **Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual 3rd Edition**. Bethesda, Maryland. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 2018.

MESA-MINGRANCE JL, ARIZA-LÓPEZ FJ. Accuracy Assessment of Digital Elevation Models (DEMs): A Critical Review of Practices of the Past Three Decades. **Remote Sensing**. 2020. DOI: 10.3390/rs12162630

MITISHITA, Edson, *et al.* O uso de veículos aéreos não tripulados (VANTS) em aplicações de mapeamento aerofotogramétrico. In: XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia, V Congresso Brasileiro de Geoprocessamento, XXV Expositiva. 2014. **Anais**. Gramado, RS. Disponível em: http://www.cartografia.org.br/cbc/trabalhos/4/678/CT04-128_1404416657.pdf. Acesso em: 31/10/2016.

MOONS, Theo; GOOL, Luc Van; VERGAUWEN, Maarten. 2008. 3D Reconstruction from Multiple Images. **Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision**. Vol. 4, n°. 4 (2008) 287—398. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Theo_Moons/publication/

265190880_3D_reconstruction_from_multiple_images/links/5559abf408ae6943a876cee7/3D-reconstruction-from-multiple-images.pdf. Acesso em: 16/5/2018

MORAES, Marcus Vinícius Antunes de. **Monitoramento e avaliação de processos erosivos marginais em reservatórios de usinas hidrelétricas por meio de varredura a laser**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) — Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus de Presidente Prudente, Universidade Estadual de São Paulo. 2016.

NEX, Francesco; REMONDINO, Fabio. UAV for 3D mapping applications: a review. **Applied Geomatics**, v. 6. 2013. DOI: 10.1007/s12518-013-0120-x

PEREIRA, Djalma Martins; RATTON, Eduardo; BLASI, Gilza F.; PEREIRA, Márcia A. KUSTER FILHO, Wilson. **Projeto Geométrico de Rodovias**. Apostila. Curso Engenharia Civil, Disciplina Infraestrutura Viária, Universidade Federal do Paraná. 2010. Disponível em < http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/10139/material/APOSTILA_ProjetoGeometrico_2010.pdf > Acesso em: 29/06/2022.

PIMENTA, Carlos R.T. e OLIVEIRA, Márcio P. **Projeto Geométrico de Rodovias**. 2ª ed. RiMa Editora. São Carlos. 2004

POLIDORI, Laurent; EL HAGE, Mhamad. Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review. **Remote Sensing**. v.12. 2020. DOI: 10.3390/rs12213522
REHAK, M.; SKALOUD, J. FIXED-WING MICRO AERIAL VEHICLE FOR ACCURATE CORRIDOR MAPPING. *In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-1/W1. 2015. **Proceedings**. DOI: 10.5194/isprsannals-II-1-W1-23-2015

RESTORE Project. National Centre for Research Methods. University of Southampton *in: RESTORE Project online resources repository*. **Module 4 - Binary Logistic Regression. 4.12 The SPSS Logistic Regression Output**. 2011. Disponível em: <https://www.restore.ac.uk/srme/www/fac/soc/wie/research-new/srme/modules/mod4/index.html>. Acesso em: 15/03/2022.

SANTOS, Afonso de Paula. **GeoPEC - Software para avaliação da acurácia posicional em dados cartográficos**. 2018. Disponível em: <http://www.geopec.com.br/>. Acesso em: 15/03/2022.

SANTOS, Afonso de Paula; RODRIGUES, Daldo Domingos; SANTOS, Nerilson Terra; JUNIOR, Joel Gripp. Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais utilizando técnicas de estatística espacial: Proposta de método e exemplo utilizando a norma brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, p. 630-650. 2016. DOI: 10.1590/S1982-21702016000400036

SANZ-ABLANEDO, E., CHANDLER, J.H., BALLESTEROS-PEREZ, P.; RODRIGUEZ-PEREZ, J.R. Reducing systematic dome errors in digital elevation models through better UAV flight design. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 45. 2020. DOI: 10.1002/esp.4871.

SILVA, Cristiano Alves. **Avaliação da acurácia dos ortomosaicos e modelos digitais do terreno gerados por VANT e sua aplicação no cálculo de volume de pilhas de rejeito da**

Pedra Cariri. 2015. Dissertação (Mestrado em Geologia) — Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará. 2015.

SOUZA, Cristinano B. Limites e possibilidades de aplicações de modelos digitais de elevação gerados a partir de produtos obtidos por sensores remotos nos cálculos de volumes de terraplenagem. **Revista TCU**, Julho/Dezembro, n. 144, p. 132-165, 2019. Disponível em <<https://revista.tcu.gov.br/ojs/index.php/RTCU/article/view/1610/1792>>. Acesso em: 27/06/2022.

STOTT, Eilidh; WILLIAMS, Richard D.; HOEY, Trevor B. Ground Control Point Distribution for Accurate Kilometre-Scale Topographic Mapping Using an RTK-GNSS Unmanned Aerial Vehicle and SfM Photogrammetry. **Drones**. v.4. 2020. DOI: 10.3390/drones4030055

TEDESCO, Angélica; ACCO, Isabela; SOUZA, Joseline. Estudo da geometria de imagens obtidas por VANT em faixa de duto, a partir de pontos de apoio GPS. In: XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia, V Congresso Brasileiro de Geoprocessamento, XXV Expositiva. 2014. **Anais**. Gramado, RS. Disponível em <http://www.cartografia.org.br/cbc/trabalhos/4/759/CT04-155_14044405.pdf>. Acesso em: 31/10/2016.

TOMMASELLI, A.M.G. **Fotogrametria Básica**. Presidente Prudente: Departamento de Cartografia, 2009 (Apostila) e suas atualizações. Capítulo I: Introdução. Disponível em <http://www.faed.udesc.br/arquivos/id_submenu/891/introducao_a_fotogrametria.pdf> Acesso em: 11/12/2017.

TOURNADRE V., DESEILLIGNY, M; FAURE, P.H. UAV linear photogrammetry. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-3/W3. 2015. **Proceedings**. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-3-W3-327-2015

TURNER, D., LUCIEER, A.; WALLACE, L. Direct Georeferencing of Ultrahigh-Resolution UAV Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 52, p. 2738-2745. 2014. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2265295.

WIACEK, Paweł. Determining corridor mapping accuracy using UAV photogrammetry. In: 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference - SGEM. 2020. **Proceedings**. p. 199-206. DOI: 10.5593/sgem2020/2.2/s10.024

ZHANG, H.; ALDANA-JAGUE, E.; CLAPUYT, F.; WILKEN, F.; VANACKER, V.; VAN OOST, K. Evaluating the potential of post-processing kinematic (PPK) georeferencing for UAV-based structure-from-motion (SfM) photogrammetry and surface change detection. **Earth Surface Dynamics**. v.7, p. 807-827. 2019. DOI: 10.5194/esurf-7-807-2019

ZHANG, W., QI, J., WAN, P., WANG, H., XIE, D., WANG, X., YAN, G., 2016. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. **Remote Sens**. 8. <https://doi.org/10.3390/rs8060501>