

MATHEUS HENRIQUE MAIA LISBOA

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL TRIDIMENSIONAL DE
PRODUTOS CARTOGRÁFICOS UTILIZANDO UM ELIPSOIDE DE
INCERTEZAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

L769a
2019
Lisboa, Matheus Henrique Maia, 1989-
Avaliação da acurácia posicional tridimensional de produtos
cartográficos utilizando um elipsoide de incertezas / Matheus
Henrique Maia Lisboa. – Viçosa, MG, 2019.
xiii, 97f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Afonso de Paula dos Santos.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.89-95.

1. Cartografia - Controle de qualidade. 2. Imagem
tridimensional. 3. Modelos matemáticos. I. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

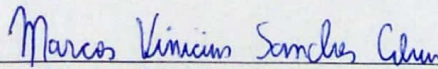
CDD 22 ed. 526

MATHEUS HENRIQUE MAIA LISBOA

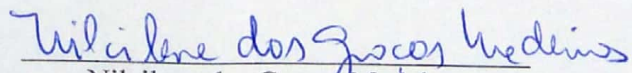
**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL TRIDIMENSIONAL DE
PRODUTOS CARTOGRÁFICOS UTILIZANDO UM ELIPSOIDE DE
INCERTEZAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

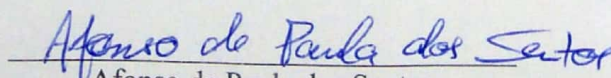
APROVADA: 01 de março de 2019.



Marcos Vinicius Sanches Abreu



Nilcilene das Graças Medeiros
(Coorientadora)



Afonso de Paula dos Santos
(Orientador)

*A minha mãe Andrea Coutinho Maia
meu ídolo e minha mentora.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida

A minha família, sem o apoio e os conselhos nada disso seria possível.

A Universidade Federal de Viçosa, pelos conhecimentos e vivências adquiridas.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil, em especial aos do Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartografia pelos ensinamentos e excelência na docência.

Ao professor Afonso de Paula Santos pela orientação, discussão e críticas ao trabalho, sem seus conselhos eu não conseguiria.

A professora Nilcilene Medeiros pela coorientação, críticas e conselhos ao trabalho.

Ao professor Marcus Vinicius por aceitar compor a banca e apresentar sugestões que contribuíram muito para a concretização deste trabalho.

Aos amigos da Pós Graduação em Engenharia Civil, Informações Especiais – Raiane, Layane, Franciele, Youlia, Priscila, Lucas, Iann, Sidimar, Diego e Jairo – pelas horas de estudo, discussões, reclamações e diversões vividas.

A minha namorada Vanessa Aparecida Nogueira pela paciência, conselhos, amizade e carinho por esta longa jornada.

Ao meu pai Luís Lisboa, pelos conselhos e acolhimento durante os momentos difíceis.

Em especial gostaria de agradecer a minha mãe Andrea Coutinho pelo carinho, conselhos, por sempre me incentivar a estudar e me dedicar ao máximo em todas as minhas atividades, por sempre me ouvir e me guiar pelo caminho da vida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS.....	ix
RESUMO.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo geral.....	4
2.2 Objetivos específicos	4
3. JUSTIFICATIVA.....	4
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
4.1 Modelos Digitais de Terreno	5
4.2 Controle de qualidade cartográfica	6
4.3 Padrão Brasileiro de Acurácia Posicional.....	8
4.3.1 Acurácia posicional planimétrica - ET-CQDG	10
4.3.2 Acurácia posicional altimétrica - ET-CQDG	12
4.4 Análise estatística voltada ao controle de qualidade posicional	13
4.5 Controle de qualidade posicional de produtos cartográficos tridimensionais .	17
4.5.1 Método de acurácia posicional a partir da propagação de variâncias do Decreto 89.817/84, proposta por Santos (2015)	19
4.6 Elipsoide dos Erros	22
5. METODOLOGIA	26
5.1 Proposição do método de avaliação da acurácia posicional 3D utilizando um Elipsoide de Incertezas (EPSI).....	26

5.2	Proposição do método de avaliação da acurácia posicional 3D utilizando um Elipsoide de Incertezas (EPSI) e sua orientação na classificação.....	30
5.3	Experimentos Práticos	33
5.3.1	<i>Análise da eficiência do Elipsoide de Incertezas (EPSI) utilizando dados simulados.</i>	33
5.3.2	<i>Estudo de caso 1: aplicação do método proposto na avaliação de um MDS do município de Alvinópolis-MG</i>	35
5.3.3	<i>Estudo de caso 2: aplicação do método proposto na avaliação do produto de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) do campus da Universidade Federal de Viçosa-MG</i>	38
5.3.4	<i>Estudo de caso 3: aplicação do método proposto na avaliação de um MDS híbrido utilizando imagens do sensor PRISM/ALOS</i>	41
5.3.5	<i>Estudo de caso 4: utilização da orientação do método proposto para a classificação do produto cartográfico</i>	43
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
6.1	Resultados e discussões dos dados simulados	47
6.2	Resultados e discussões do estudo de caso 1	54
6.3	Resultados e discussões do estudo de caso 2	62
6.4	Resultados e discussões do estudo de caso 3	68
6.5	Resultados e discussões do estudo de caso 4	75
7.	CONCLUSÃO	87
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE A.....	96
	A1 - Matriz variância e covariância dos pontos de referência do estudo de caso 4	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Interpretações dos conceitos de acurácia, precisão e tendência.....	8
Figura 2- Avaliação da acurácia posicional de MDS/MDE de forma errônea	19
Figura 3 - Avaliação da acurácia posicional de MDS/MDE de forma correta.....	19
Figura 4 - Representação usual dos erros, em que a planimetria é representada pela elipse (plana) e a altimetria é representada por uma linha (vertical)	22
Figura 5 - Elipse dos Erros	25
Figura 6 - Representação gráfica do Elipsoide dos Erros.....	25
Figura 7 - Elipsoide cujos parâmetros são dados pelas tolerâncias do Decreto nº. 89.817/1984	27
Figura 8 - Elipsoide cujos semieixos são definidos pelo PEC	28
Figura 9 - Elipsoide cujos semieixos são definidos pelo EP do Decreto nº. 89.817/1984	29
Figura 10 - Representação da tolerância tridimensional preconizada pelo Decreto nº. 89.817/1984	29
Figura 11 - Fluxograma das etapas para a classificação com o elipsoide de tolerâncias	30
Figura 12 - Discrepâncias em um conjunto de dados com variância de 2 metros.....	34
Figura 13 - Localização do município de Alvinópolis	35
Figura 14 - Distribuição dos pontos de referência no município de Alvinópolis.....	37
Figura 15 - Produtos gerados pelo VANT (à esquerda, o MDT, e à direita, o ortofotomosaico).....	39
Figura 16 - Distribuição dos pontos de referência na ortoimagem.....	40
Figura 17 - Espacialização dos pontos de controle e referência na imagem	42
Figura 18 - MDS composto gerado	42
Figura 19 - Localização da área de estudo do município de Paula Cândido	44
Figura 20 - Distribuição dos pontos de controle ao longo do município de Paula Cândido	45
Figura 21 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de	47
Figura 22 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/1.000 e equidistância das curvas de nível de 1,0 metro.....	48

Figura 23 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/2.000 e equidistância das curvas de nível de 1,0 metro.....	48
Figura 24 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/5.000 e equidistância das curvas de nível de 2,0 metros	49
Figura 25 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/10.000 e equidistância das curvas de nível de 5,0 metros	49
Figura 26 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/25.000 e equidistância das curvas de nível de 10,0 metros	50
Figura 27 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/50.000 e equidistância das curvas de nível de 20,0 metros.....	50
Figura 28 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/100.000 e equidistância das curvas de nível de 50,0 metros.....	51
Figura 29 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/250.000 e equidistância das curvas de nível de 100,0 metros.....	51
Figura 30 - Discrepâncias dos pontos de referência na avaliação da ortoimagem ALOS/PRISM e MDS SRTM	55
Figura 31 - Discrepâncias corrigida do efeito sistemático na altimetria dos pontos de referência na avaliação da ortoimagem ALOS/PRISM e MDS SRTM	56
Figura 32 - Resumo dos resultados do estudo de caso 1	60
Figura 33 - Discrepâncias dos pontos de checagem utilizados na avaliação dos produtos (ortofoto e MDT) gerados a partir de um aerolevantamento por VANT	63
Figura 34 - Discrepâncias dos ponto de checagem corrigida da tendência	64
Figura 35 - Resumo dos resultados do estudo de caso 2	68
Figura 36 - Discrepância dos pontos de checagem, utilizados na avaliação da ortoimagens e MDSALOS/PRISM	69
Figura 37 - Discrepância dos pontos de checagem da avaliação ALOS/PRISM, sem outlier e minimizada dos efeitos sistemáticos	70
Figura 38 - Resumo dos resultados do estudo de caso 3	74
Figura 39 - Discrepância dos pontos de checagem utilizados na avaliação do produto tridimensional obtidodo <i>Google Earth</i>	75
Figura 40 - Discrepância referenciados pontos de checagem utilizados para avaliação do produto Google Earth, corrigidas dos efeitos sistemáticos.....	76

Figura 41 - Resumo dos resultados do estudo de caso 4	81
Figura 42 - Comportamento das tolerâncias para classe A da Escala 1/10.000-Eq: 20 m.	82
Figura 43 - Resumo dos resultados do estudo de caso 4, comparando a utilização da orientação do Elipsoide de Incertezas com os modelos tridimensionais.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Classes de mapas em relação à acurácia posicional, de acordo com as tolerâncias do Decreto nº. 89.817/1984	9
Tabela 2-Classificação posicional de cartas, segundo o Decreto no. 89.817/1984	10
Tabela 3 - Resumo dos dados simulados.....	52
Tabela 11-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/10.000 e Eq. 5 m, na avaliação da ortoimagem ALOS/PRISM e MDS SRTM.....	59
Tabela 12-Resultado da classificação, segundo a propagação de variâncias para a escala de 1/10.000 e Eq. 5 m, na avaliação da ortoimagem ALOS/PRISM e MDS SRTM	59
Tabela 13-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/10.000 e Eq. 5 m, na avaliação da ortoimagem ALOS/PRISM e MDS SRTM.....	59
Tabela 14-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/5.000 e Eq. 2 m, para a ortofoto e MDT VANT	64
Tabela 15-Resultado da classificação, segundo a propagação de variâncias para a escala de 1/5.000 e Eq. 2 m, para a ortofoto e MDT VANT.....	65
Tabela 16-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/5.000 e Eq. 2 m, para a ortofoto e MDT VANT	65
Tabela 17-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/2.000 e Eq. 1 m, para a ortofoto e MDT VANT	66
Tabela 18-Resultado da classificação, segundo a propagação de variâncias para a escala de 1/2.000 e Eq. 1 m, para a ortofoto e MDT VANT.....	66
Tabela 19-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/2.000 e Eq. 1 m, para a ortofoto e MDT VANT	66
Tabela 21-Resultado da classificação, segundo a propagação de variâncias para a escala de 1/1.000 e Eq. 1 m, para a ortofoto e MDT VANT	67
Tabela 22-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/1.000 e Eq. 1 m, para a ortofoto e MDT VANT	67
Tabela 23-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/50.000 e Eq. 20 m, para o produto ALOS/PRISM.....	71
Tabela 24-Resultado da classificação, segundo a propagação de variâncias para a escala de 1/50.000 e Eq. 20 m, para o produto ALOS/PRISM	71

Tabela 25-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/50.000 e Eq. 20 m, para o produto ALOS/PRISM.....	71
Tabela 26-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/25.000 e Eq. 10 m, para o produto ALOS/PRISM.....	72
Tabela 27-Resultado da classificação, segundo a propagação de variâncias para a escala de 1/25.000 e Eq. 10 m, para o produto ALOS/PRISM.....	72
Tabela 28-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/25.000 e Eq. 20 m, para o produto ALOS/PRISM.....	72
Tabela 29-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/10.000 e Eq. 5 m, para o produto ALOS/PRISM.....	73
Tabela 31-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/10.000 e Eq. 5 m, para o produto ALOS/PRISM.....	73
Tabela 32-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/25.000 e Eq. 50 m, para o produto Google Earth.....	77
Tabela 33-Resultado da classificação, segundo a Propagação de Variâncias para a escala de 1/25.000 e Eq. 50 m, para o produto Google Earth.....	77
Tabela 34-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/25.000 e Eq. 50 m, para o produto Google Earth.....	78
Tabela 35-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/10.000 e Eq. 20 m, para o produto Google Earth.....	78
Tabela 36-Resultado da classificação, segundo a Propagação de Variâncias para a escala de 1/10.000 e Eq. 20 m, para o produto Google Earth.....	78
Tabela 37-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/10.000 e Eq. 20 m, para o produto Google Earth.....	79
Tabela 38-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/5.000 e Eq. 10 m, para o produto Google Earth.....	79
Tabela 39-Resultado da classificação, segundo a propagação de variâncias para a escala de 1/5.000 e Eq. 10 m, para o produto Google Earth.....	80
Tabela 41-Resultado da classificação, segundo a orientação do Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/25.000 e Eq. 50 m, para o produto Google Earth.....	83
Tabela 42-Resultado da classificação, segundo a orientação do Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/10.000 e Eq. 20 m, para o produto Google Earth.....	83

Tabela 43-Resultado da classificação, segundo a orientação do Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/5.000 e Eq. 10 m.....	84
--	----

RESUMO

LISBOA, Matheus Henrique Maia, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2019. **Avaliação Da Acurácia Posicional Tridimensional De Produtos Cartográficos Utilizando Um Elipsoide De Incertezas**. Orientador: Afonso de Paula dos Santos. Coorientadora: Nilcilene das Graças Medeiros.

A acurácia posicional é uma das etapas mais importantes do controle de qualidade cartográfica, pois valida a localização espacial de determinada feição no mapa. No Brasil, a avaliação da acurácia posicional de produtos cartográficos segue as diretrizes do Decreto n.º 89.817/1984. Esse decreto divide a acurácia posicional em duas componentes: planimétrica e altimétrica. Produtos tridimensionais, como Modelos Digitais de Superfície/Elevação (MDS/MDE), acabam sendo avaliados separadamente em componentes, contudo, Santos (2015) e Li *et al.* (2005) citam que a forma mais eficiente de se avaliar esse tipo de produto é por meio da resultante entre as componentes planimétricas e altimétricas. Sendo assim, este trabalho propõe um método para a avaliação da acurácia tridimensional de produtos cartográficos, por meio das componentes tridimensionais de uma superfície geométrica, um elipsoide, cujas dimensões são dadas pelas tolerâncias descritas no Decreto n.º 89.817/1984. Posteriormente, o método proposto (chamado de EPSI) foi confrontado com as metodologias do Decreto 89.817/ET-CQDG e de Santos (2015). Para verificar a eficiência do método, foram simuladas 27.000 discrepâncias e, em aproximadamente 90% dos casos, o método proposto foi mais restritivo se comparado à planimetria, e, em 50% dos casos, quando comparado à altimetria. No restante dos casos, o método se apresentou equivalente à análise separada da planimetria e da altimetria, conforme Decreto 89.817/ET-CQDG. Utilizando exemplos práticos para comparar as três metodologias, pode-se perceber que é mais restritivo o uso de uma metodologia que avalia em conjunto as componentes planimétricas e altimétricas de um produto cartográfico tridimensional. Ao se comparar a metodologia de Santos (2015) com o método EPSI, percebe-se que o EPSI é mais restritivo para escalas maiores, porém para escalas menores, essa classificação se apresenta melhor quando se aplica a metodologia proposta por Santos (2015). Com tudo, ao utilizar a orientação do EPSI, para pequenas escalas, as duas metodologias, EPSI e Santos (2015), apresentam a mesma classificação, sendo as duas mais rigorosas que a usualmente aplicada.

ABSTRACT

LISBOA, Matheus Henrique Maia, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2019. **Assessment of Three-dimensional Positional Accuracy of Cartographic Products Using an Ellipsoid of Uncertainties**. Adviser: Afonso de Paula dos Santos. Co-adviser: Nilcilene das Graças Medeiros.

Positional accuracy is one of the most important steps in cartographic quality control, since it validates the spatial location of a feature on the map. In Brazil, the evaluation of positional accuracy of cartographic products follows the guidelines of Decree No. 89.817/1984. This decree divides the positional accuracy into two components: planimetric and altimetric accuracy. Three-dimensional products, such as Digital Surface or Elevation Models, are usually analyzed separately in components, however, Santos (2015) and Li et al. (2005) cite that the most efficient way to evaluate this type of product is through the resultant between the planimetric and altimetric components. In this context, this work proposes a method to assess the three-dimensional accuracy of cartographic products, through the three-dimensional components of a geometric surface, an ellipsoid whose dimensions are given by the tolerances described in Decree No. 89.817/1984. Subsequently, the proposed method (called EPSI) was confronted with the Decree No. 89.817/ET-CQDG and Santos (2015) methodologies. To verify the proposed method's efficiency, 27,000 discrepancies were simulated. The EPSI was more restrictive than the others methods, in approximately 90% of the results, by comparing the planimetric accuracy, and in 50%, when compared to altimetric accuracy. In the remaining cases, the proposed method was equivalent to the separate analysis of planimetry and altimetry, according to Decree No. 89.817/ET-CQDG. Practical examples were used to compare the three methods, from what it could be observed that the use of a methodology that evaluates together the planimetric and altimetric components of a three-dimensional cartographic product is more restrictive. When comparing the Santos (2015) methodology with the EPSI method, it is perceived that the EPSI is more restrictive for larger scales, while the first one appears that way to smaller scales. However, when using the EPSI, for small scales, both methodologies, EPSI and Santos (2015), present the same classification, the two being more rigorous than the one usually applied.

1. INTRODUÇÃO

A produção cartográfica tem sido, ao longo dos anos, amplamente desenvolvida, sobretudo, em função de um avanço impulsionado pela Eletrônica e pela Informática. Com essa evolução tecnológica diversos produtos geoespaciais como: imagens de alta resolução e modelos digitais da superfície terrestre são gerados e disponibilizados diariamente.

Com essa grande disseminação de produtos geoespaciais, a produção cartográfica tornou-se mais facilitada. A utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) e o alcance de Informação Geográfica Voluntária (VGI), que ganhou destaque com a Web 2.0, tornam qualquer usuário como um produtor de informação espacial (BRAVO e SLUTER, 2015).

Apesar disso, Galo e Camargo (1994) já apresentavam que com a facilidade na produção cartográfica surgem usuários não especializados e empresas não habilitadas produzindo conteúdos de forma equivocada ou incoerentes, subestimando a qualidade do produto.

Uma das formas de verificar e/ou de identificar a produção cartográfica equivocada é por meio do controle de qualidade em sua produção. Segundo Nogueira Junior (2003), o controle de qualidade é um processo de validação extremamente importante, pois legitima o produto com a identificação de erros e de inconsistências, levando em conta a finalidade que os dados espaciais pretendem atingir.

As normas da série ISO 19.1XX contêm padrões e elementos destinadas a informações geográficas. Dentre elas, a ISO 19.157 (2013) aborda especificamente a qualidade dos dados geoespaciais. De acordo com essa norma, os parâmetros da qualidade geoespacial são: completude, consistência lógica, acurácia temática, acurácia posicional, acurácia temporal e usabilidade.

Segundo Mozas e Ariza (2014), a acurácia posicional é um dos principais elementos no controle de qualidade cartográfica, já que verifica o quão próximo, posicionalmente, esse produto está em relação a uma referência.

No Brasil, a avaliação da acurácia posicional de produtos cartográficos segue as diretrizes do Decreto nº. 89.817 (BRASIL, 1984), que classifica o produto quanto à sua fidelidade posicional por meio da discrepância entre pontos homólogos no produto teste e sua referência (obtidas em campo ou em um produto cartográfico mais acurado).

Existem outras normas elaboradas pela Diretoria de Serviços Geográficos do Exército (DSG), como a Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) e a Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG), que dão suporte à interpretação do Decreto nº. 89.817/1984.

A maioria das normas, tanto as brasileiras quanto as internacionais, realizam a avaliação da acurácia posicional separadamente em planimetria e a altimetria. Segundo Li *et al.* (2005), há duas formas de se analisar um produto tridimensional, separadamente (planimetria e altimetria) ou conjuntamente (resultante tridimensional), porém não há consenso entre a comunidade científica sobre qual forma adotar, sendo a avaliação conjunta a mais indicada. De acordo com Li *et al.* (2005) e com Santos *et al.* (2016), a utilização da avaliação conjunta é mais difícil de se implementar, sendo este o motivo da negligência na utilização da acurácia planimétrica em avaliação de modelos tridimensionais.

Santos (2015) afirma que a avaliação separada pode ser equivocada quando se trata de produtos cartográficos tridimensionais, como Modelos Digitais de Elevação (MDE) e Modelos Digitais de Superfície (MDS). MDEs e MDSs são representações matemáticas da superfície terrestre e são modelos amplamente utilizados nas áreas militares e de engenharia para representações de feições da superfície terrestre e para o planejamento de obras (LI *et al.*, 2005).

Infelizmente, pouco se conhece sobre a avaliação da acurácia posicional tridimensional. Em poucos trabalhos relacionados a essa linha de pesquisa, Ariza (2002) e Nero (2005) sugerem a utilização da Fórmula de Koppe, que estima as incertezas planimétrica e altimétrica, de curvas de nível, por meio de coeficientes de uma regressão linear entre as discrepâncias altimétricas e a tangente do ângulo de inclinação do terreno (OLIVEIRA *et al.*, 2017) para o controle de qualidade de produtos cartográficos.

Outro trabalho que trata desse assunto é o de Santos (2015), que propôs uma metodologia de avaliação da acurácia posicional tridimensional por meio da propagação de variâncias horizontal e vertical, do Decreto nº. 89.817/1984, em uma componente tridimensional. Segundo o autor, por meio de experimentos práticos, essa metodologia que utiliza a componente tridimensional é mais rigorosa que a avaliação realizada separadamente.

Ainda segundo Santos (2015), há também a proposição de uma metodologia de avaliação da acurácia posicional planimétrica, altimétrica e tridimensional de dados

espaciais por meio da utilização de técnicas geoestatísticas que abordam a independência e a normalidade dos dados. Diferentemente do Decreto nº. 89.817/1984, esta metodologia baseia-se na determinação da escala máxima de utilização, aliada a uma classe obtida pelo enquadramento dos dados a um intervalo de confiança.

Métodos com feições lineares estão sendo desenvolvidos para a avaliação da acurácia tridimensional. Dentre eles, pode-se citar os trabalhos de La Vega *et al.* (2016) e Fonseca (2018), que propõe metodologias de avaliação da acurácia tridimensional em feições lineares, por meio dos métodos da Distância de Hausdorf, Influência do Vértice, Banda Épsilon e Buffer Simples. Inicialmente, esses métodos foram desenvolvidos para análise planimétrica, porém os autores adaptaram cada um deles para a situação tridimensional.

Como apresentado, há poucas maneiras de avaliar produtos tridimensionais conjuntamente, tanto com feições pontuais, quanto com feições lineares. A proposição de novos métodos é fundamental para o desenvolvimento de técnicas mais eficientes na avaliação da acurácia posicional tridimensional e para o controle de qualidade cartográfica, visto que os métodos tridimensionais são mais indicados para a avaliação de produtos tridimensionais, como sugerido por Li *et al.* (2005). Segundo Santos (2015) além dos modelos tridimensionais analisarem de forma conjunta as componentes planimétricas e altimétricas, os mesmos tendem a ser mais restritivos e rigorosos, ou seja, apresentam um maior rigor na avaliação da acurácia do produto 3D.

Representar incertezas de forma conjunta é muito comum nas Ciências Geodésicas. Uma das formas de representar a acurácia ou a incerteza de uma grandeza é por meio de sua elipse de confiança, no caso da planimetria (bidimensional), ou o elipsoide de confiança, no caso da planialtimetria (tridimensional). Em casos tridimensionais, é muito interessante utilizar o elipsoide, pois, dessa maneira, é possível avaliar o efeito da acurácia nas três componentes (X, Y e Z) de forma conjunta (MATOS, 2017). Assim, pode-se vislumbrar a utilização de um elipsoide, formado a partir de tolerâncias para as três componentes, para avaliar a acurácia posicional tridimensional de produtos cartográficos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é o estudo de metodologia para a avaliação da acurácia posicional tridimensional no controle de qualidade de produtos cartográficos.

2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um novo método de avaliação da acurácia posicional tridimensional baseado na forma matemática de um elipsoide, por meio da utilização das tolerâncias definidas no Decreto nº. 89.817/1984, na ET-ADGV e na ET-CQDG;
- Avaliar a influência da orientação deste elipsoide, obtida da Matriz Variância e Covariância (MVC) dos pontos de referência, no processo de avaliação da acurácia tridimensional;
- Verificar a eficácia do método proposto por meio de simulações e testes em estudos de caso, em comparação com a metodologia proposta por Santos (2015).

3. JUSTIFICATIVA

A análise do controle de qualidade de produtos cartográficos tridimensionais conjunta ainda é pouco explorada e o seu conceito é raramente abordado na literatura. Li *et al.* (2005) afirmam que a forma mais correta de se avaliar um produto cartográfico tridimensional é por meio da análise conjunta das componentes. Como dito, a norma nacional não aborda uma metodologia para esse tipo de avaliação. Santos (2015) propõe alguns conceitos sobre a análise conjunta dos dados planimétricos e altimétricos, que tendem a ser mais restritivos que sua análise separadamente. Porém, os estudos nesta área são insipientes sendo necessárias novas metodologias e métodos para avaliar esse tipo de produto cartográfico.

Este trabalho busca um novo método para o controle de qualidade posicional de dados tridimensionais em feições pontuais. Espera-se que possa ser um método mais rigoroso e restritivo, e de fácil aplicação do que o usualmente aplicado, visto que não há uma regra que aborda a avaliação de produtos cartográficos tridimensionais.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico são abordados os principais temas relacionados aos conceitos e fundamentos para a metodologia da avaliação da acurácia tridimensional utilizando um Elipsoide de Incertezas. Primeiramente, serão definidos os conceitos de modelos digitais de terreno. Em seguida, abordasse-a controle de qualidade cartográfica expondo os conceitos do Padrão de Acurácia Posicional Brasileiro, bem como sua aplicação no controle de qualidade de produtos cartográficos tridimensionais. Por fim, serão tratados os conceitos a respeito do Elipsoide dos Erros.

4.1 Modelos Digitais de Terreno

Modelos Digitais de Terreno (MDT) são representações matemáticas (numéricas) da superfície da Terra. Segundo Li *et al.* (2005), os MDTs são representações tridimensionais da distribuição espacial de um ou mais parâmetros sobre o terreno. A expressão matemática que o representa é apresentada na equação 1.

$$P_i = f(X_i, Y_i) \quad (1)$$
$$i = 1, 2, 3, \dots, m$$

Em que:

P é o valor do parâmetro na posição i ; e X_i, Y_i é o par de coordenadas bidimensional na posição i .

O parâmetro de um MDT pode ser a topografia, a precipitação, a temperatura, os dados sociais, entre outros.

Além do termo MDT, as representações cartográficas tridimensionais mais utilizadas são os Modelo Digitais de Elevação (MDE) e os Modelos Digitais de Superfície (MDS). De acordo com Li *et al.* (2005), os MDE representam dados de altitude da superfície do terreno sem edificações e vegetação. Já o MDS leva em consideração não só a altitude da superfície do terreno, mas também vegetação, edificações e qualquer outro objeto presente na área de estudo.

Os MDEs são amplamente utilizados em diversas aplicações, dentre elas, a ortorretificação de imagens para correção do efeito do relevo; a geração de Modelos Hidrograficamente Condicionados (MDEHC), que é a melhor forma de representação do escoamento pluvial; a geração de mapas de declividade, obras de engenharia, etc.

Por sua vez, MDSs são muito utilizados em ambientes urbanos e oferecem grandes vantagens para a obtenção de informações a respeito das edificações urbanas, o que permite definir as dimensões geométricas das edificações (CENTENO e MITISHITA, 2007).

Outra superfície pode ser extraída a partir da diferença entre o MDS e o MDE. Essa nova superfície apresenta apenas objetos acima do terreno, e recebe o nome de Modelo Digital de Superfície Normalizado (MDSN), cujas aplicações são para análise de edificações e de vegetações em áreas urbanas (WEIDNER e FÖRSTNER, 1995).

4.2 Controle de qualidade cartográfica

O controle da qualidade cartográfica é o processo de avaliação do grau de utilidade esperado ou adquirido do produto cartográfico. Segundo Nero (2005), a qualidade cartográfica identifica o quão discrepante o produto está da realidade, ou seja, qual a discrepância que um usuário pode esperar, sem trazer riscos para a sua finalidade. Ainda segundo o autor, a ausência do controle de qualidade pode trazer consequências negativas no planejamento e na manutenção de empreendimentos.

Goodchild (2010) observa a importância do controle de qualidade para investigar dados espaciais ao garantir a qualidade e a acurácia dos mesmos, apresentar suas discrepâncias, omissões e incertezas, bem como definir sua finalidade.

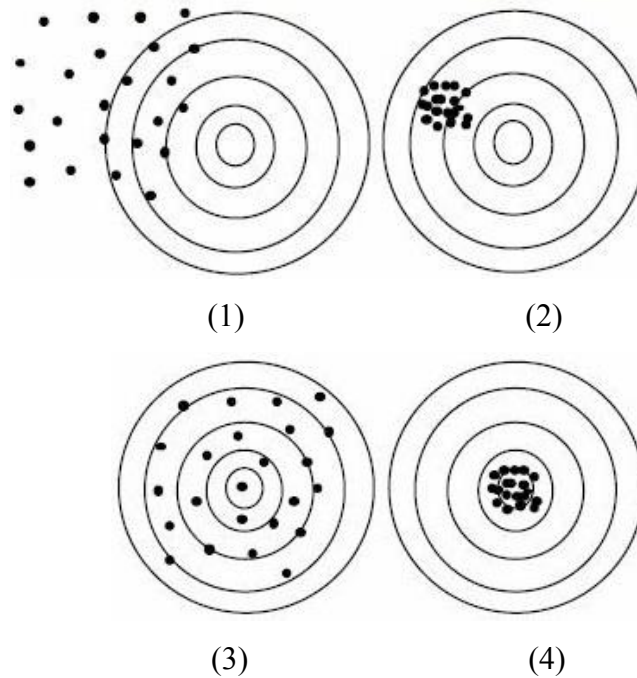
A ISO 19157 (2013) define os principais componentes da qualidade cartográfica: completude, que identifica os excessos e as ausências de feições no produto cartográfico; consistência lógica, ou seja, o grau de aderência às regras lógicas da estrutura dos dados; acurácia temática, que define a acurácia quantitativa e qualitativa dos atributos; acurácia temporal, que determina a qualidade e os relacionamentos temporais dos atributos e das feições; usabilidade, sendo baseada em requisitos do usuário para descrever informações de qualidade/adequação específica acerca de um conjunto de dados para uma determinada aplicação; acurácia posicional, que define a acurácia da posição espacial da feição dentro de um sistema de referência espacial.

Segundo Mozas e Ariza (2014), a acurácia posicional é um dos principais componentes dos dados espaciais, e determina a proximidade das coordenadas dos elementos do produto cartográfico em relação a um referencial mais acurado.

Nas Ciências Geodésicas e Cartográficas, o termo “acurácia” é corriqueiro, pois, segundo Monico *et al.* (2009), ele é um termo que associa o grau de incerteza de uma grandeza, ao incorporar tanto efeitos sistemáticos quanto efeitos aleatórios, e apresentar o grau de proximidade de uma estimativa com o seu valor mais provável.

A Figura 1 apresenta um exemplo do tiro ao alvo, que representa o conceito de acurácia, precisão e tendência. Na Figura 1.1, os dados não são acurados, já que são tendenciosos e poucos precisos. Entretanto, na Figura 1.2, os dados são mais acurados do que na figura 1.1, pois são precisos e com uma tendência de menor magnitude. Na Figura 1.3, os dados são imprecisos e com baixa tendência. Por fim, na Figura 1.4, há o alvo com dados mais acurados entre os demais, já que são precisos e com baixa tendência.

Figura 1 - Interpretações dos conceitos de acurácia, precisão e tendência em um tiro ao alvo



Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2016)

4.3 Padrão Brasileiro de Acurácia Posicional

No Brasil, o controle de qualidade de produtos cartográficos segue as diretrizes do Decreto nº. 89.817/1984, que estabelece as normas técnicas para a cartografia nacional a serem seguidas por todas as entidades públicas e privadas produtoras ou usuárias de serviços cartográficos. Elas determinam padrões mínimos a serem instituídos no desenvolvimento das atividades cartográficas, além de outras definições.

No artigo 8º desse Decreto é apresentada uma das principais definições da classificação do produto cartográfico quanto à sua acurácia posicional. Essa acurácia deve obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), um indicador estatístico de dispersão dos dados.

De acordo com esse decreto, 90% dos pontos testados no terreno deverão apresentar discrepância inferior ao PEC, que corresponde a $1,6449 \times EP$ (Erro Padrão). Nessa norma consideram-se equivalentes os termos Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro Médio Quadrático.

Segundo o decreto, as cartas são classificadas de acordo com a sua acurácia, e são divididas em três classes, A, B e C, definidas a partir do PEC e do EP, conforme a Tabela 1.

Tabela 1-Classes de mapas em relação à acurácia posicional, de acordo com as tolerâncias do Decreto nº. 89.817/1984

CLASSE	PEC(mm) _{Plan}	EP(mm) _{Plan}	PEC (m) _{Alt}	EP(m) _{Alt}
A	0,50 x Escala	0,30 x Escala	1/2 x eq. Curvas de Nível	1/3 x eq. Curvas de Nível
B	0,80 x Escala	0,50 x Escala	3/5 x eq. Curvas de Nível	2/5 x eq. Curvas de Nível
C	1,00 x Escala	0,60 x Escala	3/4 x eq. Curvas de Nível	1/2 x eq. Curvas de Nível

Fonte: Elaborada pelo autor

Segundo Santos (2010), as determinações para a classificação de um produto cartográfico, segundo o Decreto nº 89.817/1984, são muito confusas e apresentam várias interpretações. Com isso, diversos trabalhos possuem diferentes formas de classificação da acurácia do produto cartográfico, dentre eles, os de Tommaselli *et al.* (1988), Galo e Camargo (1994), Nogueira Junior (2003), Nero (2005) e de Fonseca *et al.* (2016).

Percebe-se que este decreto comete alguns equívocos, sendo eles: falta de detalhamento acerca dos testes a serem realizados para a avaliação do produto espacial; indefinição de qual parâmetro planimétrico (isoladamente entre as componentes ou a resultante planimétrica) a ser testado; e não especifica qual deve ser a medida de dispersão dos dados, ou seja, ele classifica equivocadamente erro-padrão, desvio-padrão e erro quadrado médio como iguais.

Em dezembro de 2008, com a publicação do Decreto nº. 6.666, que prevê a criação da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), ficou a cargo da Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR) a elaboração de normas e padrões dos dados geoespaciais.

Entre 2010 e 2012, foi publicada a ET-ADGV (Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais) pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (DSG) em conjunto com a CONCAR. Uma de suas atribuições foi propor uma forma de interpretação acerca do Decreto nº. 89.817/1984 para a avaliação da acurácia posicional em produtos cartográficos

De acordo com a ET-ADGV, para um produto ser classificado, ele deve atender a dois critérios: (i) 90% dos pontos testados devem ser inferiores ao valor do PEC;

(ii) apresentar valores de Desvio Padrão ou de Erro Médio Quadrático iguais ou inferiores ao EP. A ET-ADGV continuou com o erro conceitual do Decreto nº. 89.817/1984 ao considerar Desvio-Padrão e Erro Médio Quadrático iguais.

Esta norma também trouxe uma nova classe para os produtos cartográficos digitais, sendo os produtos classificados em quatro classes, sendo elas: A, B, C e D. Nesse caso, a classe A é mais restritiva e as classes B, C e D correspondentes com as A, B e C do Decreto nº. 89.817/1984. A Tabela 2 apresenta o conceito de classificação de acordo com a ET-ADGV e o Decreto nº. 89.817/1984.

Tabela 2-Classificação posicional de cartas, segundo o Decreto no. 89.817/1984

CLASSE					
Decreto nº. 89.817/84	ET-ADGV	PEC(mm) _{Plan}	EP(mm) _{Plan}	PEC(m) _{Alt}	EP(m) _{Alt}
-	A	0,28 x Escala	0,17 x Escala	0,27 x eq. Curvas de Nível	1/6 x eq. Curvas de Nível
A	B	0,50 x Escala	0,30 x Escala	1/2 x eq. Curvas de Nível	1/3 x eq. Curvas de Nível
B	C	0,80 x Escala	0,50 x Escala	3/5 x eq. Curvas de Nível	2/5 x eq. Curvas de Nível
C	D	1,00 x Escala	0,60 x Escala	3/4 x eq. Curvas de Nível	1/2 x eq. Curvas de Nível

Fonte: Elaborada pelo autor

Em 2016, foi publicada, pela DSG, a ET-CQDG (Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais), documento ainda não homologado pela CONCAR. A ET-CQDG apresenta uma forma padronizada para avaliar a qualidade dos produtos de conjuntos de dados geoespaciais, sendo baseada no Decreto nº. 89.817/1984, na ET-ADGV e na ISO 19157:2013. A ET-CQDG define vários conceitos sobre medidas de qualidade dos dados e seus descritores, dentre eles, a medida de acurácia posicional, que define uma metodologia a ser executada para o controle de qualidade posicional, apresentada a seguir.

4.3.1 Acurácia posicional planimétrica - ET-CQDG

Primeiramente, deve-se realizar o cálculo das tolerâncias do PEC e do EP planimétrico para a escala e classe a ser testada. Em seguida, deve-se definir o tamanho da amostra a ser utilizada no processo de avaliação da acurácia posicional, para isso utiliza-se os parâmetros definidos na ISO 2859-1 e ISO 2559-2.

Definido o número de amostras, realiza-se a distribuição destas no produto teste. As amostras devem ser localizadas em pontos de melhor identificação na referência e no produto teste. Coleta-se então as coordenadas dos pontos do produto de teste e as coordenadas de seus homólogos na referência. Lembrando que, segundo Merchant (1982), as coordenadas dos pontos de referência devem apresentar precisão planimétrica, de no mínimo, três vezes superior do que a do produto a ser avaliado.

De posse das coordenadas dos pontos de teste e suas coordenadas homologas na referência, calcula-se então as discrepâncias das componentes planimétricas (equações 2 e 3). Os pontos do produto testado são identificados pelo sufixo “t” e os pontos de referência são identificados pelo sufixo “r”.

$$d_x = X_t - X_r \quad (2)$$

$$d_y = Y_t - Y_r \quad (3)$$

Após, calcula-se a componente horizontal das discrepâncias (d_{2D}) para cada ponto de referência “i” da amostra, como apresentado na equação 4.

$$d_{2Di} = \sqrt{d_{xi}^2 + d_{yi}^2} \quad (4)$$

Em seguida, deve-se calcular a raiz da discrepância quadrática média (RMS_{2D}) da amostra planimétrica (equação 5).

$$RMS_{2D} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{2Di}^2)}{n}} \quad (5)$$

De acordo com esta metodologia para que o produto seja acurado para a escala e classe de teste, o mesmo deve atender as duas condições, definidas no Decreto nº 89.817/1984, ou seja, (i) pelo menos 90% das discrepâncias planimétricas (d_{2Di}) devem ser inferiores ou iguais à tolerância do PEC planimétrico da classe e escala de teste, e (ii)

a raiz da discrepância quadrática média (RMS_{2D}) da amostra deve ser menor ou igual à tolerância do EP planimétrico da classe e escala de teste.

Satisfazendo as duas condições (*i* e *ii*) simultaneamente o produto teste é acurado planimetricamente para classe e escala desejadas. Caso ele não atenda uma ou a outra condição, deve-se alterar a classe e/ou a escala de teste (alterar para uma menor) e realizar novamente as duas condições com a nova tolerância do PEC planimétrico e a nova tolerância do EP planimétrico.

4.3.2 Acurácia posicional altimétrica - ET-CQDG

Analogamente tópico 4.3.1, determina-se as tolerâncias do PEC e do EP altimétrico para a classe e escala de teste, com base na equidistância das curvas de nível. Define-se o número de amostras conforme a ISO 2859-1 e ISO 28592. Distribui-se estas amostras em pontos de fácil identificação no produto teste e seus homólogos na referência, lembrando que a precisão altimétrica da referência deve ser o triplo da precisão do produto teste.

Após, calcula-se a discrepância da componente altimétrica (equação 6) de cada ponto. O produto testado é identificado pelo sufixo “t” e a referência é identificada pelo sufixo “r”.

$$d_z = Z_t - Z_r \quad (6)$$

Calcula-se a raiz da discrepância quadrática média (RMS_z) da amostra altimétrica (equação 7).

$$RMS_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{zi}^2)}{n}} \quad (7)$$

Para a classificação do produto, deve-se atender a duas condições: (i) no mínimo 90% das discrepâncias altimétricas (d_z) devem ser inferiores ou iguais à tolerância do PEC altimétrico para classe e escala de teste, (ii) o RMS_z deve ser inferior à tolerância do EP altimétrico para classe e escala de teste.

Sendo as duas condições atendidas simultaneamente, o produto é acurado altimetricamente para a classe e escala desejada. Caso ele não atenda uma ou a outra condição, deve-se alterar a escala de teste (alterar para uma menor) e realizar novamente as duas condições com a nova tolerância do PEC altimétrico e a nova a tolerância do EP altimétrico.

4.4 Análise estatística voltada ao controle de qualidade posicional

A estatística é um forte aliada no controle de qualidade espacial. Através de testes, pode-se inferir acerca do comportamento dos dados avaliados (discrepâncias) identificando, por exemplo, *outliers* e efeitos sistemáticos (tendência) que podem inviabilizar as análises.

Santos *et al.* (2016) apresenta uma metodologia que incorpora técnicas simples de estatística espacial no controle de qualidade posicional de dados espaciais. Os autores propõem a utilização da análise do padrão de distribuição espacial das amostras no produto cartográfico, detecção de efeitos sistemáticos nas amostras e *outliers*.

Segundo os mesmos autores, para a avaliação da acurácia posicional, as amostras de checagem devem estar distribuídas por toda a área de estudo. Essa distribuição amostral deve seguir um padrão disperso ou aleatório ao longo do produto. Sendo assim, os autores sugerem avaliação da distribuição espacial das amostras por meio da utilização da função K de Ripley, que avalia a distribuição espacial em diferentes intervalos de distância.

Este é uma ferramenta estatística apropriada para determinar se existe agrupação entre os padrões de pontos ou se simplesmente o padrão é aleatório em diferentes escalas (GETIS e FRANKLIN, 1987; BATISTA e MAGUIRE, 1998 CAPRETZ *et al.*, 2012)

A seguir é apresentada a formulação da função K de Ripley. Para mais informações buscar Wong e Lee (2005).

$$K(h) = \frac{A}{n^2} \sum_i \sum_j I_h(d_{ij}) \quad (8)$$

Sendo:

d_{ij} é a distância entre os pontos i e j ;

I_h é um função indicadora. $I_h = 1$ se $d_{ij} < h$, caso contrário $I_h = 0$;

A é a área de estudo;

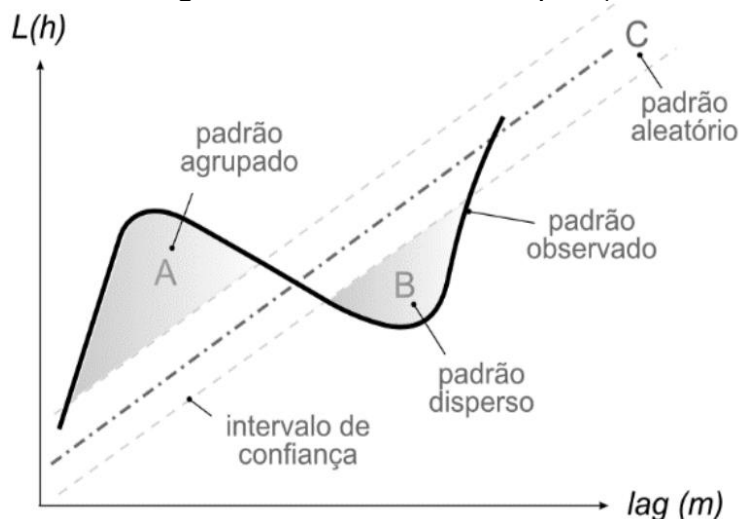
n é o número de amostras.

Por meio da análise gráfica dos resultados, pode-se deduzir sobre o padrão de distribuição das amostras, onde o eixo das abcissas representa as distâncias (h) e o eixo das ordenadas refere-se a função $L(h)$. Os valores acima da reta do padrão aleatório indicam padrão agrupado, enquanto os valores abaixo indicam padrão disperso. Caso a curva fique fora do intervalo de confiança do padrão aleatório, os padrões agrupados e dispersos são considerados significantes.

No gráfico da figura 2 é ilustrado o comportamento ilustrando na região A o padrão agrupado, região B padrão disperso e região C padrão aleatório.

$$L(h) = \sqrt{\frac{K(h)}{\pi}} - h \quad (9)$$

Figura 2 – Gráfico gerado com o resultado da aplicação da Função K.



Fonte: Santos *et al.* (2016)

Outliers na amostra também comprometem a análise dos dados, estes, quando encontrados, devem ser eliminados da amostra. Segundo Amorin (2004), *outliers* são discrepâncias ou resíduos que, estatisticamente, se diferenciam do conjunto de dados ao qual pertencem.

Para a detecção de *outliers*, no controle de qualidade posicional, geralmente aplica-se o teste do 3σ . De acordo com Dalmolin (2004) uma observação é tida como erro grosseiro, se o módulo do resíduo desta observação for maior que três vezes o sigma a posteriori. Realizando uma analogia, temos que o valor absoluto das discrepâncias superiores que ao triplo do EP (3σ) devem ser consideradas como *outlier* (NERO, 2005; SANTOS *et al.*, 2016).

Efeitos sistemáticos nas amostras comprometem a análise dos dados. Esta, quando se tratando do controle de qualidade posicional, são amostras de discrepâncias posicionais que apresentam algum tipo de vício em seu comportamento, ou seja, as discrepâncias posicionais apresentam certa tendência em uma direção.

Para identificar esta tendência nas discrepâncias aplica-se o teste *t* de *Student* (MERCHANT, 1982). O teste *t* de *Student* é aplicado a um nível de confiança de 90%, avaliando as hipóteses H_0 contra H_1 :

$$H_0: \bar{X} = 0$$

$$H_1: \bar{X} \neq 0$$

Primeiramente calcula-se a estatística amostral ($t_{calculado}$), com a equação 10, e compara-se com o valor tabelado ($t_{(n-1, \alpha/2)}$), obtido por meio da tabela bilateral.

$$t_{calculado\ x} = \frac{\mu_x \cdot \sqrt{n}}{\delta_x} \quad (10)$$

Em que:

μ_x = média das discrepâncias de x ;

n = número de amostras;

δ_x = desvio padrão das discrepâncias de x .

Estando o valor absoluto de $t_{calculado}$ menor que o valor tabelado (equação 11), rejeita-se a hipótese nula, ou seja, existem efeitos sistemáticos significativos na amostra.

$$|t_{calculado}| < t_{(n-1, \alpha/2)} \quad (11)$$

Caso o produto apresente efeitos sistemáticos em suas discrepâncias realiza-se a translação do produto teste no sentido oposto ao da média das discrepâncias, para minimizar seus efeitos. Então aplica-se novamente o teste *t* de *Student* afim de testar a não rejeição da hipótese nula. Este teste deve ser aplicado em cada uma das três componentes posicionais (X, Y e Z).

Lembrando que para a aplicação do teste *t* de *Student* a amostra das discrepâncias deve apresentar uma distribuição normal. Para isso, aplicam-se testes como o de *Shapiro Wilk*, sugerido por Torman *et al.* (2012) como sendo um dos mais eficientes métodos para identificação da normalidade dos dados.

Para a aplicação do teste de *Shapiro Wilk*, utiliza-se a estatística *w*, a um nível de confiança de 95%. Primeiramente formulam-se as hipóteses H_0 contra H_1 .

H_0 : Amostra provem de uma população normal.

H_1 : Amostra não provem de uma população normal.

Realizar então o cálculo da estatística *w* ($w_{calculado}$).

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

Onde:

x_i é um elemento da amostra;

\bar{x} é a média da amostra.

$$b = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n/2} (a_{n-i+1}) \times (x_{(n-i+1)} + x_{(i)}); & \text{caso } n \text{ for par} \\ \sum_{i=1}^{(n+1)/2} (a_{n-i+1}) \times (x_{(n-i+1)} + x_{(i)}); & \text{caso } n \text{ for impar} \end{cases} \quad (13)$$

Em que (a_{n-i+1}) são constantes geradas pelas médias, variâncias e covariâncias das estatísticas de ordem de uma amostra de tamanho n de uma distribuição normal.

Por fim avalia a estatística do teste através do P-valor. Caso o resultado seja significativo, então a variável aleatória em questão não segue uma distribuição normal.

4.5 Controle de qualidade posicional de produtos cartográficos tridimensionais

Segundo Li *et al.* (2005), a avaliação da acurácia posicional tridimensional pode ser realizada de duas formas: (i) avaliando a planimetria e a altimetria separadamente; ou (ii) avaliando simultaneamente a planimetria e a altimetria por meio de uma resultante tridimensional. A primeira forma é a mais utilizada, no Brasil e em diversos outros países, pois não há padrões de tolerância tridimensionais.

A maioria das normas, tanto nacionais quanto internacionais, que definem a qualidade posicional cartográfica avaliam a acurácia planimétrica e altimétrica separadamente, como as normas norte americanas NMAS (*National Map Accuracy Standart*, 1947), EMAS (*Engineering Map Acuracy Standart*, 1985) e a NSSDA (*National Standart for Spacial Data Accuracy*, 1990).

De acordo com Pereira e Nero (2012), as normas de Portugal (IGP, 2004a, 2004b, 2004c), da Austrália (ICSM, 2009), da África do Sul (DRDLR, 2010a, 2010b e 2010c), do México (INEG, 2010) e do Japão (GSI, 2010) também avaliam a acurácia planimétrica e altimétrica separadamente.

Apesar da maioria das normas não abordarem a acuraria tridimensional, a STANAG 2215 (2010), norma da OTAN, apresenta a acurácia tridimensional como a pior classificação entre a planimetria e altimetria. Entretanto Santos (2015) cita que essa norma não aborda, de fato, a acurácia tridimensional, pois a mesma não avalia conjuntamente as componentes planimétricas e altimétricas.

Os padrões brasileiros avaliam a acurácia planimétrica e altimétrica separadamente. Diversos são os trabalhos que avaliam a qualidade posicional de produtos cartográficos tridimensionais de forma separada, como em Zanardi (2006) que, na geração de MDTs a partir de um par estereoscópico do satélite CBERS-2 comparando com o modelo SRTM, utilizou somente a altimetria para avaliar a qualidade de seu

produto gerado baseado no PEC por meio do teste do Qui-Quadrado. Também se percebe, nesse caso, a não análise da componente planimétrica.

Camargo *et al.* (2009) avaliaram a acurácia posicional de um MDE ASTER/TERRA em área montanhosa por meio do PEC, o que resultou em uma classificação altimétrica do produto na classe B, escala 1/50.000, e planimétrica na classe A, escala 1/25.000.

Cruz *et al.* (2011) avaliaram a acurácia planialtimétrica dos modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) obtidos por meio do LIDAR, com a utilização do PEC. O produto foi classificado na planimetria como classe A, escala 1/2.000 e altimetria na classe C, escala 1/5.000.

Oliveira (2011) realizou uma análise de Modelos Digitais de Superfície gerados a partir de imagens do sensor PRISM/ALOS, em que, além de avaliar a qualidade posicional, também realizou técnicas de processamento digital de imagens para obter melhores resultados, e alcançou uma acurácia planimétrica classe A, escala 1/25.000 (melhor situação), e acurácia altimétrica classe C, escala 1/25.000 (melhor situação).

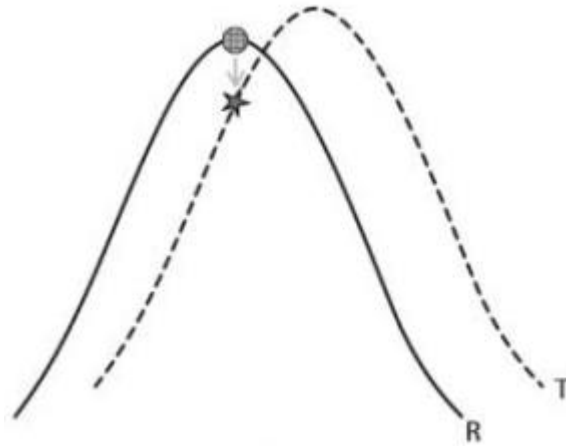
Iorio *et al.* (2012) avaliaram a acurácia posicional de MDEs derivados de imagens do satélite ALOS/PRISM, porém os autores consideraram a planimetria livre de erros e avaliaram somente a altimetria dos dados.

Ariza (2002) e Imhof (1982) sugerem a utilização desta Formula de Koppe para a avaliação da qualidade posicional de produto cartográficos. A formula de Koppe estima a incerteza vertical e horizontal de curvas de nível por meio de valores de coeficientes da regressão linear entre as discrepâncias altimétricas e a tangente do ângulo de inclinação do terreno. Oliveira *et al.* (2017) utilizaram a formula de Koppe para a avaliação da qualidade posicional de um MDS da região de Viçosa-MG, onde a mesma apresentou classificação similar a preconizada pelo decreto 89.817/84. Os autores propuseram uma metodologia para sua classificação, visto que não há uma padronização para a sua utilização.

De acordo com Santos *et al.* (2016), a principal dificuldade para a avaliação da acurácia de MDS e MDE está na identificação de pontos homólogos nesses tipos de produtos. Vários usuários desses produtos consideram a planimetria livre de erros. A Figura 2, extraída de Santos *et al.* (2016), apresenta como são realizados os testes sobre produtos tridimensionais de forma errônea. Neste caso, o topo do morro de referência (simbolizado pelo círculo) é projetado de forma equivocada no produto teste (simbolizado

pela estrela), ou seja, desconsideram-se as incertezas na planimetria. Na Figura 3, é apresentado como deve ser realizada a avaliação tridimensional de forma correta, ou seja, utilizando os pontos homólogos, em que o topo de morro da referência deve ser relacionado com o topo de morro do teste (simbolizado pelo quadrado).

Figura 2- Avaliação da acurácia posicional de MDS/MDE de forma errônea



Fonte: Santos *et al.* (2016)

Figura 3 - Avaliação da acurácia posicional de MDS/MDE de forma correta



Fonte: Santos *et al.* (2016)

4.5.1 Método de acurácia posicional a partir da propagação de variâncias do Decreto 89.817/84, proposta por Santos (2015)

Segundo Santos (2015), em seu trabalho de análise de acurácia posicional de MDS, a avaliação da acurácia posicional tridimensional (a partir da propagação de

variâncias) mostra-se mais restritiva que a análise separada da altimetria e planimetria, como preconizado pelo Decreto nº. 89.817/1984.

Primeiramente define-se o modelo funcional, onde a resultante tridimensional (d_{3D}) como sendo a resultante entre a planimetria (d_{2D}) e a altimetria (d_Z), como mostra equação 14.

$$d_{3Di} = \sqrt{d_{2Di}^2 + d_{Zi}^2} \quad (14)$$

A propagação de variâncias, expressa a variância de uma função composta por variáveis aleatórias. Gemael (2015) apresenta o método para propagação de variâncias de forma matricial, descrita na equação 15

$$(\sigma_{d_{3Di}})^2 = J \cdot C \cdot J^T \quad (15)$$

Onde:

$(\sigma_{d_{3Di}})^2$ é a matriz variância dos parâmetros tridimensionais;

J é a matriz jacobiana das primeiras derivadas parciais;

C é a matriz variância covariâncias das observações.

Substituindo a equação 14 na equação 15, chega-se na equação 16. Desenvolvendo a equação 16, obtém-se equação 17, que descreve o modelo matemático para a variância tridimensional.

$$\sigma_{d_{3Di}}^2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial d_{3Di}}{\partial d_{2Di}} & \frac{\partial d_{3Di}}{\partial d_{Zi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{d_{2Di}}^2 & \sigma_{d_{2Di}d_{Zi}} \\ \sigma_{d_{2Di}d_{Zi}} & \sigma_{d_{Zi}}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial d_{3Di}}{\partial d_{2Di}} \\ \frac{\partial d_{3Di}}{\partial d_{Zi}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\sigma_{d_{3Di}}^2 = \frac{d_{d_{2Di}}^2 \cdot \sigma_{d_{2Di}}^2 + d_{Zi}^2 \cdot \sigma_{d_{Zi}}^2 + 2 \cdot d_{2Di} \cdot d_{Zi} \cdot \sigma_{d_{2Di}} \cdot \sigma_{d_{Zi}}}{d_{d_{2Di}}^2 + d_{Zi}^2} \quad (17)$$

Para a aplicação deste modelo, deve-se assumir que os desvios padrão das discrepâncias planimétricas ($\sigma_{d_{2Di}}$) e altimétricas ($\sigma_{d_{Zi}}$) correspondem às tolerâncias planimétricas e altimétricas (EP_{2D} e EP_Z) descritas no Decreto nº. 89.817/1984. Substituindo, na equação 17, as tolerâncias do Decreto nº. 89.817/1984, tem-se a equação 18, que descreve o desvio padrão tridimensional ($\sigma_{d_{3Di}}$) em tolerância tridimensional (EP_{3D}).

$$EP_{3D} = \sqrt{\frac{d_{d_{2Di}}^2 \cdot EP_{2D}^2 + d_{Zi}^2 \cdot EP_Z^2 + 2 \cdot d_{2Di} \cdot d_{Zi} \cdot \sigma_{d_{2Di}} \cdot \sigma_{d_{Zi}}}{d_{d_{2Di}}^2 + d_{Zi}^2}} \quad (18)$$

Tem-se ainda que o Decreto nº. 89.817/1984 define o conceito do PEC como sendo um indicador estatístico de dispersão dos dados, equivalente à região abaixo da curva normal de variáveis unidimensionais, com probabilidade de 90%, sendo o PEC equivalente a 1,645 multiplicado pelo EP. Assim, tem-se a equação 19.

$$PEC_{3D} = 1,645 \cdot EP_{3D} \quad (19)$$

Por fim, Santos (2015) propõe que para se classificar a acurácia tridimensional do produto cartográfico, o mesmo deve atender simultaneamente às seguintes condições:

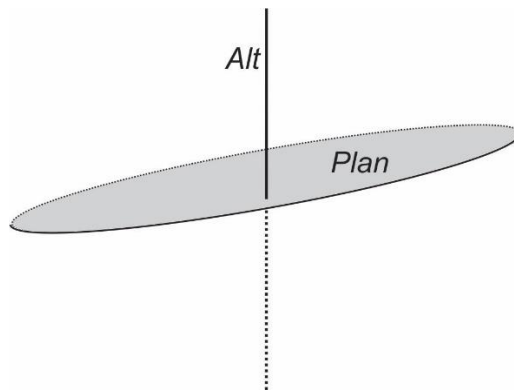
- i) 90% das discrepâncias tridimensionais dos pontos de referência em relação aos seus homólogos na referência deverão apresentar valores absolutos inferiores ou iguais aos valores do PEC_{3D} calculado para cada ponto na classe e escala testada; e
- ii) em 90% das discrepâncias, o RMS das discrepâncias tridimensionais deverá apresentar valores absolutos inferiores ou iguais aos valores do EP_{3D} calculado para cada ponto de referência.

4.6 Elipsoide dos Erros

Elipses ou Elipsoides dos Erros são representações gráficas comumente utilizadas em Ciências Geodésicas e Cartográficas para representar precisões/incertezas das coordenadas (WONG, 1976; GONÇALVES et al., 2008).

Segundo Matos (2017), as incertezas de uma coordenada podem ser representadas de forma bidimensional, por uma elipse dos erros, e, no caso tridimensional, por um Elipsoide dos Erros. Geralmente, a representação dos erros tridimensionais é realizada separadamente, como apresentado por Rodrigues (2007), em que a planimetria (X e Y) é representada por uma elipse e a altimetria (Z) é representada por uma linha (Figura 4).

Figura 4 - Representação usual dos erros, em que a planimetria é representada pela elipse (plana) e a altimetria é representada por uma linha (vertical)



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2007)

No caso tridimensional, a representação pelo Elipsoide dos Erros é mais adequada pois é possível avaliar o efeito da incerteza de forma conjunta, ou seja, as três componentes X, Y e Z combinadas.

As incertezas das coordenadas são, geralmente, estimadas a partir da Matriz Variância Covariância (MVC), que é simétrica e permite a determinação da precisão com que as coordenadas foram estimadas. Na diagonal principal da MVC, encontram-se as variâncias das coordenadas e, fora dela, encontram-se as covariâncias, como apresentado na equação 20 (CARVALHO et al., 2011).

$$MVC = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Em que:

σ_x^2 , σ_y^2 e σ_z^2 representam as variâncias das coordenadas e σ_{xy} , σ_{xz} e σ_{yz} representam as covariâncias das coordenadas.

Para a determinação dos parâmetros, tanto da Elipse dos Erros quanto do Elipsoide dos Erros, utiliza-se uma solução generalizada, baseada nos autovalores e autovetores da MVC das coordenadas.

Lipschuts e Lipson (2009) e Gemael (2015) apresentam a equação para a determinação dos autovetores e autovalores, em que, dada uma matriz $A(n \times n)$, um vetor $W(n \times 1)$ e o escalar λ , satisfazem o seguinte modelo (equação 21).

$$AW = \lambda W \quad (21)$$

Em que:

λ é um autovalor da matriz A , associado ao autovetor W .

Expandindo a equação 21, obtém-se um sistema linear de n equações homogêneas (equação 22). A solução é dada pelo determinante do sistema de equações, de acordo com a equação 23.

$$\begin{cases} (a_{11} - \lambda)w_1 + \dots + (a_{1n})w_n = 0 \\ \vdots \\ (a_{n1})w_1 + \dots + (a_{nn} - \lambda)w_n = 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (23)$$

Desenvolvendo o determinante e ordenando segundo as potências decrescentes de λ , tem-se a equação 24.

$$\lambda^n + \alpha_1\lambda^{n-1} + \alpha_2\lambda^{n-2} + \dots + \alpha_{n-1}\lambda + \alpha_n = 0 \quad (24)$$

As raízes dessa equação são os autovalores (λ_i) da matriz A . Introduzindo os autovalores na equação 22, tem-se os autovetores (W) do sistema.

Substituindo, na equação 23, a matriz A pela MVC, tem-se os autovalores e autovetores da MVC, que coincidem com as dimensões da Elipse/Elipsoide dos Erros e a orientação do mesmo, respectivamente. De acordo com Gemael (2015), do ponto de vista geodésico, interessam os casos onde $n = 2$ e $n = 3$, que representam a Elipse e o Elipsoide dos Erros.

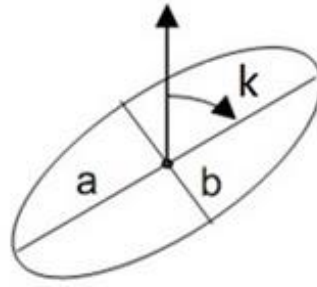
Niemeier (1982) *apud* Dalmolin e Oliveira (2003) apresentam a seguinte relação decrescente entre os autovalores, conforme equação 25.

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_n \quad (25)$$

Percebe-se, então, que o autovalor λ_1 representa a dimensão do maior semieixo da figura geométrica (Elipse ou Elipsoide). Por definição, dois ou mais autovalores são independentes entre si, visto que cada autovetor é composto por um diferente autovalor. De acordo com Dalmolin e Oliveira (2003), em redes geodésicas, a representação da direção das incertezas deve estar associada à maior incerteza, com isso, os cossenos dos autovetores do maior autovalor representam a orientação da mesma.

A Figura 5 apresenta a Elipse dos Erros, em que o semieixo maior (a) e o semieixo menor (b) são dados pelos autovalores (λ_1 e λ_2) da MVC (equação 26 e 27) e sua orientação k é dada pelos cossenos diretores dos autovetores (w_1), conforme equação 28.

Figura 5 - Elipse dos Erros



Fonte: Elaborada pelo autor

Em que:

$$a = \sqrt{\lambda_1} \quad (26)$$

$$b = \sqrt{\lambda_2} \quad (27)$$

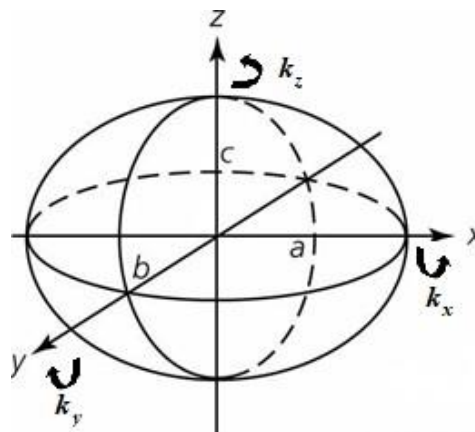
$$k = \cos^{-1}(\bar{w}_1) \quad (28)$$

Na Figura 6, é apresentado o Elipsoide dos Erros, e os parâmetros (a , b e c) do elipsoide são definidos pelos autovalores (λ_1 , λ_2 e λ_3) da MVC (equações 26, 27, 29).

A orientação do elipsoide será nas suas três direções (X , Y e Z). Essas orientações são chamadas de k_x , k_y e k_z , sendo definidas pelo cosseno diretor dos autovetores (equação 28), porém, neste caso, deve-se utilizar o maior autovetor, ou seja, o autovetor gerado do maior autavaliador (λ_1).

$$c = \sqrt{\lambda_3} \quad (29)$$

Figura 6 - Representação gráfica do Elipsoide dos Erros



Fonte: Elaborada pelo autor

5. METODOLOGIA

Neste t3pico 3e abordada a metodologia proposta para avalia33o da acur3cia posicional tridimensional, utilizando um Elipsoide de Incertezas (EPSI), bem como a sua orienta33o espacial, para a classifica33o de produtos cartogr3ficos tridimensionais.

S3o apresentados os m3todos empregados para validar este modelo, utilizando dados simulados e quatro exemplos pr3ticos (estudos de caso). Para comparar os resultados utilizou-se a classifica33o tradicional, proposta pela ET-CQDG (2016), com o m3todo de propaga33o de vari3ncias, proposto por Santos (2015) e com o m3todo do EPSI, proposto neste trabalho.

A orienta33o foi aplicada em somente um caso pr3tico, pois, para sua utiliza33o, 3e necess3rio conhecer a MVC dos pontos de refer3ncia, o que n3o foi poss3vel nos exemplos anteriores.

5.1 Proposi33o do m3todo de avalia33o da acur3cia posicional 3D utilizando um Elipsoide de Incertezas (EPSI)

O m3todo em quest3o consiste na avalia33o da acur3cia posicional conjunta da planimetria e altimetria, em produtos cartogr3ficos tridimensionais.

O Decreto n3. 89.817/1984 n3o apresenta uma avalia33o da acur3cia tridimensional, este contempla somente a acur3cia planim3trica e altim3trica separadamente. Com isso, essa metodologia prop3e a integra33o desses conceitos por meio de um elipsoide cujos semieixos s3o dados pelas toler3ncias definidas neste Decreto.

O modelo que define o elipsoide 3e apresentado pela equa33o 30, em que os denominadores (*a*, *b* e *c*) definem os semieixos da figura geom3trica e as componentes X, Y e Z sua localiza33o e orienta33o espacial.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (30)$$

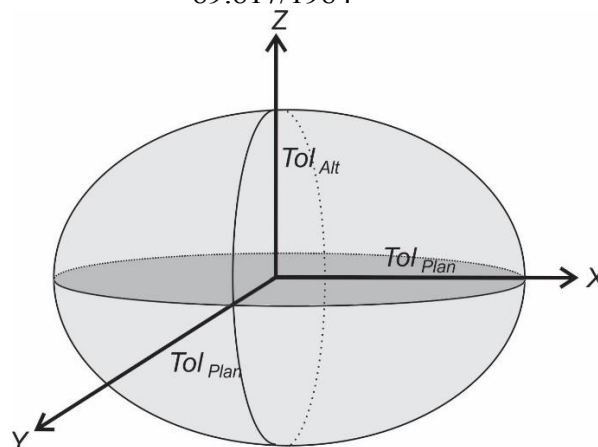
Como a norma brasileira define a toler3ncia para resultante planim3trica, necessita-se juntar os termos planim3tricos (X e Y) em uma componente, tendo, assim, um elipsoide biaxial (equa33o 31).

$$\frac{X^2+Y^2}{a^2} + \frac{Z^2}{c^2} = 1 \quad (31)$$

Este método propõe que o elipsoide represente as tolerâncias do Decreto nº. 89.817/1984. Assim, devem-se substituir os valores dos semieixos a e c pelas tolerâncias definidas no Decreto nº. 89.817/1984 (Tolerância planimétrica – TOL_{Plan} e Tolerância altimétrica TOL_{Alt}). Em seguida, calcula-se as discrepâncias das componentes entre os pontos homólogos de teste e de referência. Após, deve-se centralizar o Elipsoide de Incertezas (EPSI) com as tolerâncias do Decreto 89.817/ 1984 no ponto de referência e verificar se as discrepâncias estão dentro do elipsoide, ou seja, o ponto teste deve estar contido no elipsoide que está centralizado no ponto de referência. Para isso, a Equação 32 deve ser satisfeita.

$$\frac{X^2+Y^2}{TOL_{Plan}^2} + \frac{Z^2}{TOL_{Alt}^2} \leq 1 \quad (32)$$

Figura 7 - Elipsoide cujos parâmetros são dados pelas tolerâncias do Decreto nº. 89.817/1984



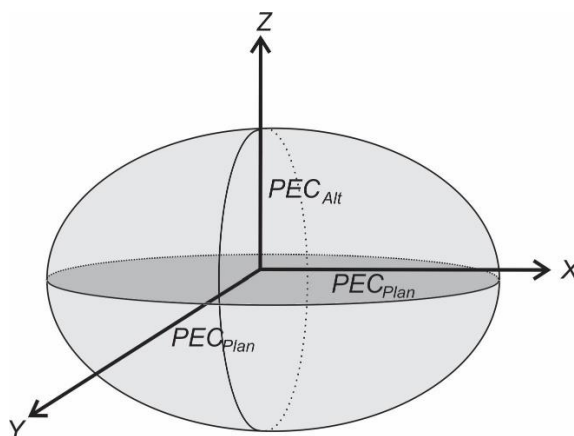
Fonte: Elaborada pelo autor

Neste caso, fazendo analogia a metodologia proposta pela ET-CQDG (2016), o método proposto do Elipsoide de Incertezas (EPSI) propõe atender duas condições para a classificação de um produto quanto à acurácia posicional tridimensional, de acordo com as classes do Decreto 89.817/1984, sendo elas:

1) 90% dos pontos testados, suas discrepâncias devem atender a condição da Equação 32. Neste caso, as discrepâncias planimétricas (d_x ; d_y) e altimétricas (d_z) serão substituídas no numerador da equação, bem como as tolerâncias do PEC da referida escala e classe de teste são substituídas no denominador (semieixos). Assim, analisa-se se a mesma é satisfeita (equação 33) em, no mínimo, 90% dos casos. Na Figura 8, tem-se a representação geométrica desta situação, em que a região contida no elipsoide da figura corresponde à região de aceitação da equação.

$$\frac{(d_x)^2 + (d_y)^2}{PEC_{Plan}^2} + \frac{(d_z)^2}{PEC_{Alt}^2} \leq 1 \quad (33)$$

Figura 8 - Elipsoide cujos semieixos são definidos pelo PEC do Decreto nº. 89.817/1984

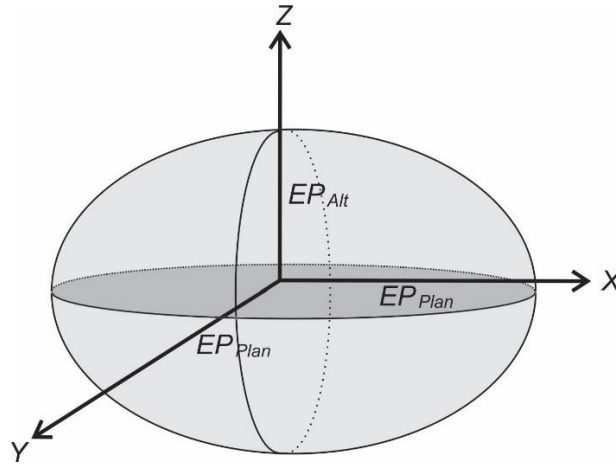


Fonte: Elaborada pelo autor

2) O RMS da amostra das discrepâncias, em cada componente (RMS_{dx} , RMS_{dy} e RMS_{dz}) deve ser substituído no numerador da equação 32, bem como as tolerâncias do EP na referida escala e classe no denominador (semieixos), conforme figura 9. Assim deve-se analisar se a Equação 34 é satisfeita

$$\frac{RMS_x^2 + RMS_y^2}{EP_{Plan}^2} + \frac{RMS_z^2}{EP_{Alt}^2} \leq 1 \quad (34)$$

Figura 9 - Elipsoide cujos semieixos são definidos pelo EP do Decreto n°. 89.817/1984



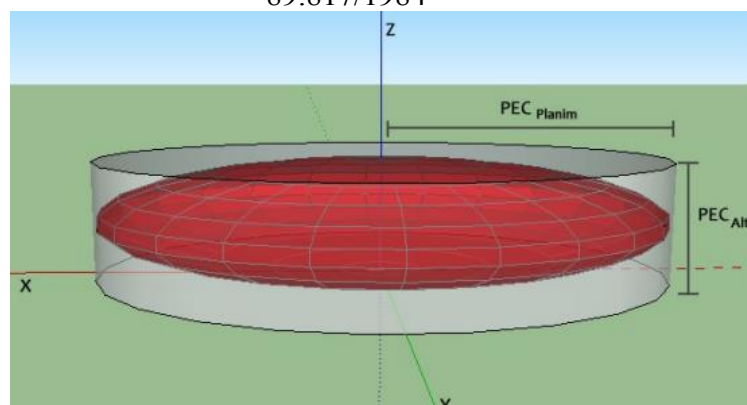
Fonte: Elaborada pelo autor

Com a proposta do método do EPSI, espera-se que a classificação seja mais restritiva do que utilizar a planimetria e altimetria separadamente em um ambiente tridimensional.

Ilustrativamente, o método proposto analisa as componentes planimétricas e altimétricas em conjunto, utilizando o elipsoide como figura geométrica das tolerâncias. Já o modelo tradicional, que analisa as componentes planimétricas e altimétricas separadamente, utiliza um cilindro como figura geométrica para representar suas tolerâncias.

A Figura 10 ilustra uma comparação entre as figuras geométricas que representam as tolerâncias analisadas conjuntamente, representada geometricamente pelo elipsoide e separadamente sendo representada pelo cilindro, em que a tolerância planimétrica representa sua base (círculo) e a tolerância altimétrica representa a altura.

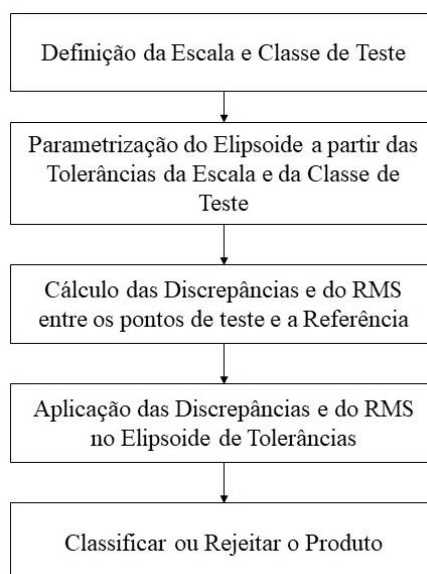
Figura 10 - Representação da tolerância tridimensional preconizada pelo Decreto n°. 89.817/1984



Fonte: Elaborada pelo autor

As etapas para a classificação da acurácia posicional tridimensional com o EPSI são apresentadas no fluxograma da Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma das etapas para a classificação com o elipsoide de tolerâncias



Fonte: Elaborada pelo autor

Primeiramente, definem-se a escala e a classe de teste para, assim, se definirem as tolerâncias (PEC e EP) (i). Definidas as tolerâncias, passa-se para o dimensionamento dos semieixos do elipsoide a partir das mesmas (ii). Definidos os semieixos, realiza-se o cálculo das discrepâncias e do RMS entre os pontos de teste e seus homólogos na referência (iii). Aplicam-se as discrepâncias na equação 33, analisando sua condição, e aplica-se o RMS na equação 34, analisando sua condição (iv). Por fim, a classificação ou rejeição do produto para a referida escala (v).

5.2 Proposição do método de avaliação da acurácia posicional 3D utilizando um Elipsoide de Incertezas (EPSI) e sua orientação na classificação

Outra proposta deste trabalho é avaliar se a orientação do elipsoide pode influenciar na avaliação da acurácia posicional tridimensional. Para isso, utiliza-se a metodologia de Gemael (2015), que define a orientação do Elipsoide dos Erros a partir da MVC das coordenadas de referência.

Assim, aplicam-se rotações sobre a equação 33. Para isso, utiliza-se uma matriz de rotação R_{xy} , apresentada na equação 35.

Como o elipsoide é biaxial, então não se faz necessária a rotação em torno do eixo “z”. Como os semieixos a e b são iguais, tem-se um círculo, e rodar um círculo entorno de um eixo que passa pelo seu centro (eixo Z) não altera sua posição. Com isso, foi negligenciada a rotação em torno do eixo “z”.

$$R_{xy} = R_x \times R_y \quad (35)$$

Em que:

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(k_x) & -\text{sen}(k_x) \\ 0 & \text{sen}(k_x) & \cos(k_x) \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos(k_y) & 0 & \text{sen}(k_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}(k_y) & 0 & \cos(k_y) \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$R_{xy} = \begin{bmatrix} \cos(k_y) & 0 & \text{sen}(k_y) \\ \text{sen}(k_x) \times \text{sen}(k_y) & \cos(k_x) & -\cos(k_y) \times \text{sen}(k_x) \\ -\cos(k_x) \times \text{sen}(k_y) & \text{sen}(k_x) & \cos(k_x) \times \cos(k_y) \end{bmatrix} \quad (38)$$

Para melhor interpretação, substitui-se a equação 38 por uma matriz de coeficientes apresentada na equação 39.

$$R_{xy} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \quad (39)$$

Em que:

$$a = \cos(k_y);$$

$$b = 0;$$

$$c = \text{sen}(k_y);$$

$$d = \text{sen}(k_x) \times \text{sen}(k_y);$$

$$e = \cos(k_x);$$

$$f = -\cos(k_y) \times \text{sen}(k_x);$$

$$\begin{aligned}
g &= -\cos(k_x) \times \sin(k_y); \\
h &= \sin(k_x); \\
i &= \cos(k_x) \times \cos(k_y);
\end{aligned}$$

Assim, tem-se que a equação para a rotação nas coordenadas deve seguir o seguinte modelo dado pela equação 40.

$$\begin{bmatrix} (d_x)' \\ (d_y)' \\ (d_z)' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (d_x) \\ (d_y) \\ (d_z) \end{bmatrix} \quad (40)$$

Em seguida, é apresentado, na equação 41, a seguir, o modelo que deverá ser atendido para a validação do PEC em função da rotação do elipsoide de tolerâncias a partir da MVC das coordenadas de referência.

$$\frac{(d_x)'^2 + (d_y)'^2}{PEC_{Plan}^2} + \frac{(d_z)'^2}{PEC_{Alt}^2} \leq 1 \quad (41)$$

Neste caso, não se faz necessário girar o elipsoide que satisfaz o EP, pois, o RMS não é um aspecto geométrico e sim um indicativo da magnitude dos efeitos sistemáticos e aleatórios dos dados da amostra, não tendo sentido alguma sua orientação espacial.

Seguindo a mesma proposta da ET-CQDG, em que o produto deve atender duas condições simultâneas, a metodologia do EPSI com a orientação também propõe atender a duas condições:

- 1) 90% dos pontos testados, suas discrepâncias devem ser orientadas, conforme equação 40, e atender a condição da equação 41. Neste caso, as discrepâncias planimétricas (d_x ; d_y) e altimétricas (d_z) serão substituídas no numerador da equação, bem como as tolerâncias do PEC da referida escala e classe de teste são substituídas no denominador (semieixos). Assim analisa-se se a mesma é satisfeita (equação 41) em, no mínimo, 90% dos casos;

2) O RMS da amostra das discrepâncias, em cada componente (RMS_{dx} , RMS_{dy} e RMS_{dz}) deve ser substituído no numerador da equação 32, bem como as tolerâncias do EP na referida escala e classe no denominador (semieixos). Assim deve-se analisar se a Equação 34 é satisfeita.

5.3 Experimentos Práticos

Para a avaliação do desempenho do método proposto, utilizou-se testes com dados simulados e estudos de caso. A simulação ocorreu em ambiente controlado, onde criou-se diversos conjuntos de discrepâncias posicionais e analisou-se os resultados da classificação do método EPSI com a proposta pela ET-CQDG (2016). Os estudos de caso contemplaram quatro exemplos práticos onde comparou-se os resultados da classificação da metodologia proposta pela ET-CQDG (2016) com a metodologia da Propagação de Variância, proposta por Santos (2015), com a metodologia do EPSI.

5.3.1 Análise da eficiência do Elipsoide de Incertezas (EPSI) utilizando dados simulados.

Vários autores como Shi e Liu (2000), Mozas e Ariza (2011), Tong *et al.* (2013) e Ferreira (2014), utilizam simulação para determinar como se comportam as incertezas em um ambiente controlado.

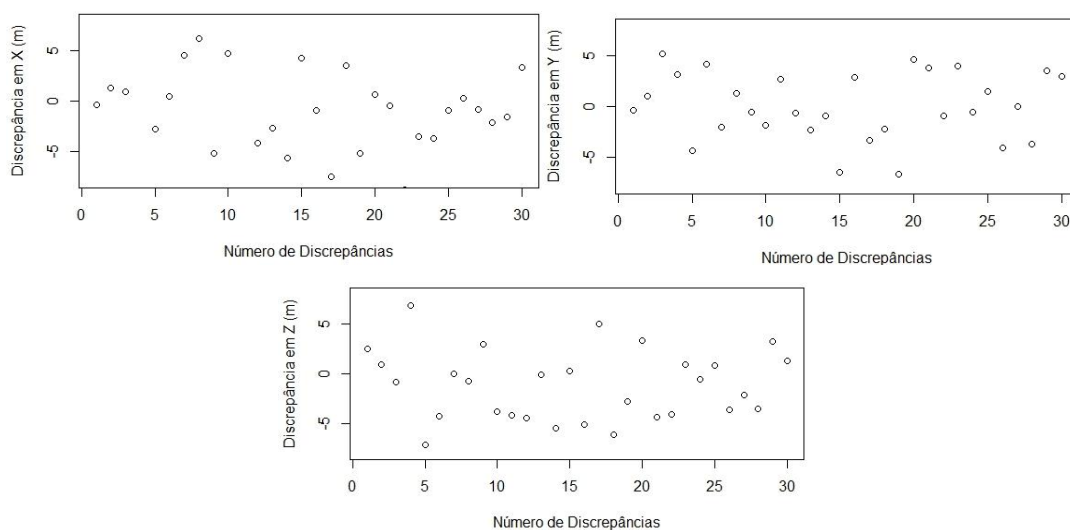
Neste trabalho, foi utilizado o *software* R, para simular um conjunto de discrepâncias planimétricas (E, N) e altimétricas (Z). As simulações foram feitas com a função *rnorm*, que simula uma distribuição normal, com média, variância e número de indivíduos variáveis (R, 2018).

Neste caso, as médias foram iguais a zero (o que representa que o conjunto de discrepâncias não apresenta efeitos sistemáticos), número de indivíduos igual a 30 e variância variável (mínimo de 0,01 e máximo de 50,0).

Para classificar as discrepâncias simuladas foi implementado, no ambiente MATLAB (2002), um programa que classifica as discrepâncias e realiza os testes de detecção de *outliers* e tendência nos dados. Esse programa classifica as discrepâncias conforme o modelo do EPSI concomitantemente à metodologia da ET-CQDG (2016), a fim de avaliar as divergências entre as classificações.

Foram simulados 900 conjuntos de dados, sendo que cada conjunto possuía 30 discrepâncias, o que totalizou 27.000 discrepâncias distintas testadas. Sendo elas divididas em nove escalas comumente utilizadas em MDS/MDT: Escala 1/500, equidistância vertical (EQ) de 0,5 metros; Escala 1/1.000, equidistância vertical de 1,0 metro; Escala 1/2.000, equidistância vertical de 1,0 metro; Escala 1/5.000, equidistância vertical de 2,0 metros; Escala 1/10.000, equidistância vertical de 5,0 metros; Escala 1/25.000, equidistância vertical de 10,0 metros; Escala 1/50.000, equidistância vertical de 20,0 metros; Escala 1/100.000, equidistância vertical de 50,0 metros; Escala 1/250.000, equidistância vertical de 100,0 metros. A Figura 12 ilustra uma distribuição das discrepâncias de um dos casos testados.

Figura 12 - Discrepâncias em um conjunto de dados com variância de 2 metros.



Fonte: Elaborada pelo autor

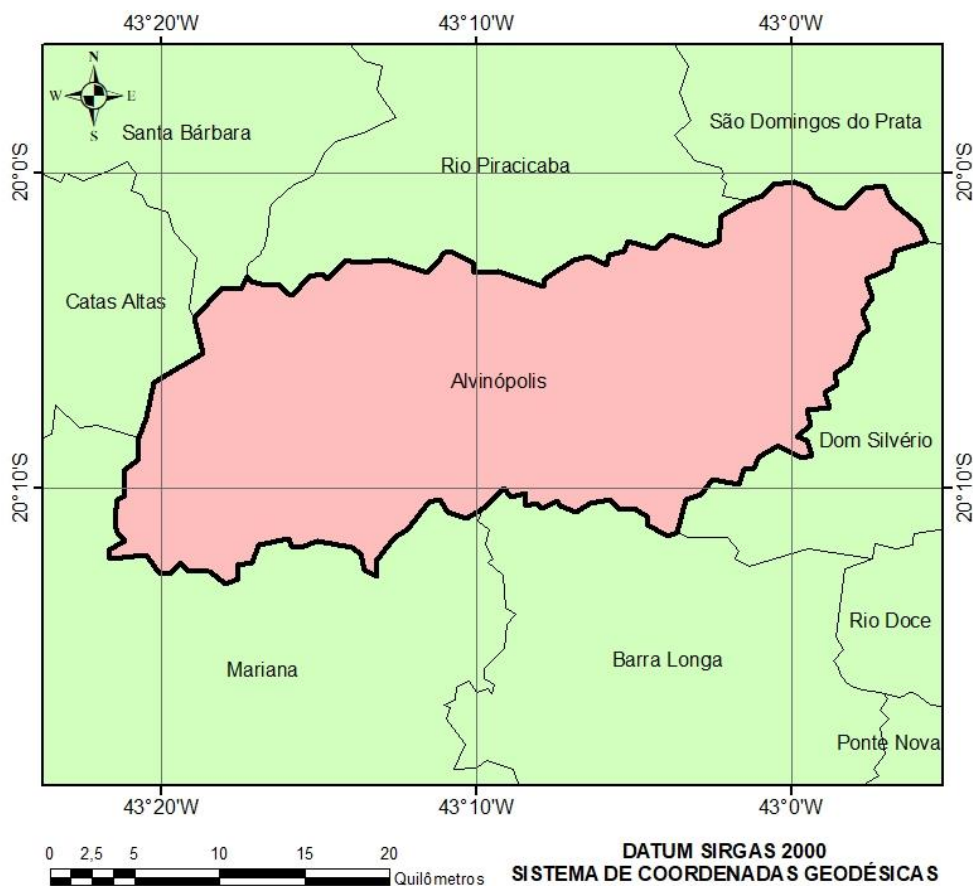
As discrepâncias utilizadas possuíam variâncias crescentes, ou seja, o primeiro conjunto de 30 amostras de discrepâncias apresentava variância menor que o último conjunto. As variâncias aumentavam proporcionalmente a dimensão da tolerância de cada escala, sendo que, para a escala 1/500 – equidistância vertical de 0,50 metros, a variância das discrepâncias foi de 0,10 metros a 0,20 metros; na escala 1/1.000 – Eq: 1,0 metro, a variância das discrepâncias foi de 0,20 metros a 0,40 metros; na escala 1/2.000 – Eq: 1,0 metro, a variância das discrepâncias foi de 0,20 metros a 0,50 metros; na escala 1/5.000 – Eq: 2,0 metros, a variância das discrepâncias foi de 0,50 metros a 1,0 metro; na escala 1/10.000 – Eq: 5,0 metros, a variância das discrepâncias foi de 3,0 metros; na escala

1/25.000 – Eq: 10,0 metros, a variância das discrepâncias foi de 5,0 metros; na escala 1/50.000 – Eq: 20,0 metros, a variância das discrepâncias foi de 5,0 metros a 10,0 metros; na escala 1/100.000 – Eq: 50,0 metros, a variância das discrepâncias foi de 10,0 metros a 25,0 metros; e na escala 1/250.000 – Eq: 100,0 metros, a variância das discrepâncias foi de 20,0 metros a 50,0 metros.

5.3.2 Estudo de caso 1: aplicação do método proposto na avaliação de um MDS do município de Alvinópolis-MG

Para avaliar melhor o desempenho do método proposto utilizou-se dados reais. Para isso, realizou-se a avaliação da acurácia posicional da imagem do satélite ALOS (*Advanced Land Observation Satellite*) sensor PRISM, juntamente com um MDS SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) para a região de Alvinópolis/MG, conforme Figura 13.

Figura 13 - Localização do município de Alvinópolis



Fonte: Elaborada pelo autor

O satélite ALOS foi lançado em janeiro de 2006, pela *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA, 2018), e entrou em operação no mês de outubro do mesmo ano.

Segundo *European Space Agency* (ESA, 2018), este satélite é composto por três sensores, sendo eles o sensor *Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping* (PRISM), o sensor *Advanced Visible and Near Infrared Radiometer - type 2* (AVNIR-2) e o sensor *Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR).

O sensor PRISM possui um radiômetro pancromático com resolução espacial de 2,50 metros, resolução radiométrica de 8 bits, resolução espectral de 0,52 a 0,77 μm e região de mapeamento de 35 quilômetros (visada lateral) e 70 quilômetros (nadir). Apresenta sistemas ópticos independentes para a produção de estereopares, possui câmeras *charge-coupled device* (CCD) e pode fornecer dados com alta acurácia (1 metro) para elaboração de modelos digitais de superfície e de levantamentos topográficos com escala de até 1:25.000 (ESA, 2018).

AVNIR-2 é um radiômetro multiespectral que opera nas regiões do visível e infravermelho, com resolução espacial de 10,0 metros, resolução radiométrica de 8 bits e área de mapeamento de 70 quilômetros (nadir). Esse sensor foi desenvolvido para mapeamentos temáticos em escalas de até 1:50.000 (ESA, 2018).

O sensor PALSAR é um radar de abertura sintética que opera na banda L, capaz de obter imagens em quaisquer condições atmosféricas (ESA, 2018).

O MDS utilizado foi o SRTM, sendo este um projeto da NASA em conjunto com a agência espacial alemã e italiana para a elaboração de um modelo global de superfície da Terra. Mais de 80% da superfície terrestre foi mapeada pelo ônibus espacial *Endeavor*, entre 11 e 22 de fevereiro de 2000, que utilizou técnicas de radar interferométricas de passagem única, em que dois sinais são emitidos ao mesmo tempo usando duas antenas de radar diferentes. Uma antena, localizada a bordo do ônibus espacial, coletou um conjunto de dados, e o outro conjunto de dados foi coletado por uma antena localizada no final de um mastro de 60 metros que se estendia para fora do ônibus espacial. A diferença entre os dois sinais permitiu o cálculo da elevação da superfície com precisão estimada de um segundo arco, aproximadamente, 30 metros (USGS, 2018).

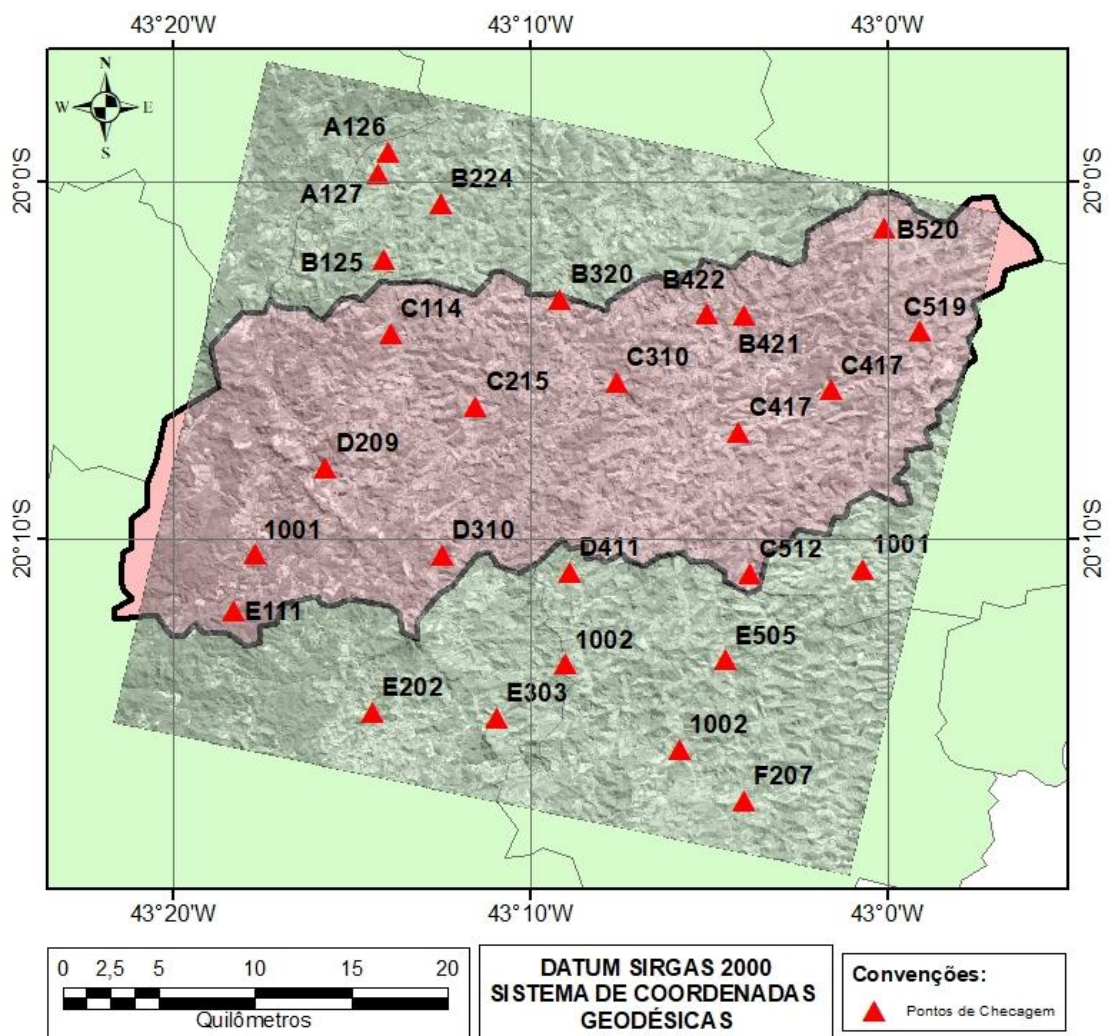
Como citado anteriormente, foi utilizada uma imagem de 2010 do satélite ALOS, sensor PRISM e um MDS SRTM. Para a avaliação da acurácia posicional, foi

usada, parte da metodologia descrita por Santos *et al.* (2016), que emprega a estatística espacial para a avaliação da acurácia posicional.

Primeiramente, definiu-se o número de amostras e sua distribuição espacial no produto. Para isso, dividiu-se a imagem em quadrantes de 7 km por 7 km, obtendo 36 quadrantes. Nestes 36 quadrantes obtidos utilizou-se a metodologia descrita pelo IBGE (2009) que sugere a utilização de entroncamentos de estradas rurais como amostras.

Dos 36 quadrantes apenas 26 apresentavam entroncamentos de estradas rurais (Figura 14).

Figura 14 - Distribuição dos pontos de referência no município de Alvinópolis



Fonte: Elaborada pelo autor

Coletadas as coordenadas na imagem e no MDS, realizou-se a comparação com as suas coordenadas homólogas em campo (referência). Essas coordenadas de

referência foram levantadas com receptor GNSS, método estático rápido com linhas de base variando de 60 a 100 km, e foi obtida uma precisão final média de, aproximadamente, 0,20 metros (SANTOS, 2010).

Após levantadas as coordenadas de referência, foram calculadas as discrepâncias entre as coordenadas do produto (imagem e MDS) e suas homólogas de referência. Nessas discrepâncias, aplicaram-se técnicas estatísticas de detecção *outliers* e tendência.

Para a detecção de *outliers*, utilizou-se a metodologia descrita no tópico 4.4, em que as discrepâncias não poderiam ser superior a um limiar de 3σ . Sendo σ como o EP da classe A, para a escala testada ($d_i < 3*EP$).

Como estudado no tópico 4.4, aplicou-se o teste de tendência por meio do teste *t* de *Student* com nível de significância de 90%.

Por fim, realizou-se a classificação do produto cartográfico, segundo a metodologia do EPSI, comparando com a metodologia de Propagação de Variâncias, proposta por Santos (2015), com a metodologia tradicional da proposta pela ET-CQDG (2016), para avaliar o comportamento dos resultados, bem como para identificar qual o método mais restritivo.

5.3.3 *Estudo de caso 2: aplicação do método proposto na avaliação do produto de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) do campus da Universidade Federal de Viçosa-MG*

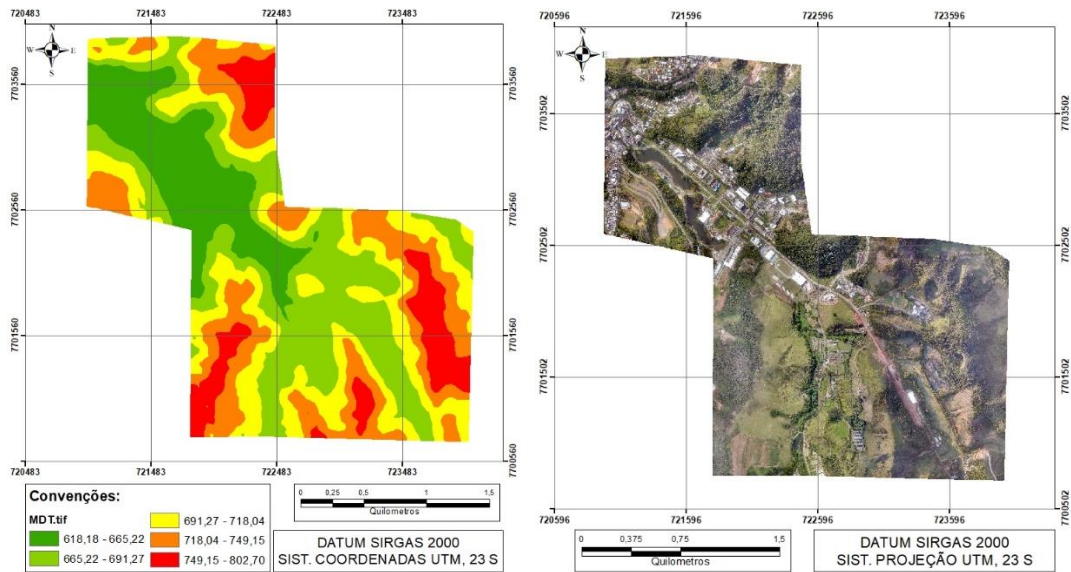
Em 2015, foi realizado um sobrevoo do *campus* da Universidade Federal de Viçosa com um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT).

O voo abrangeu uma área de 9.123 km², com um tempo de duração de 1 hora e 26 minutos. A aeronave possuía uma câmera DMC-GX1, produzindo um mosaico de 648 imagens, com uma altitude média de 700 metros, apresentando um GSD (*Ground Sample Distance*) médio de 0,10 metros e sobreposição entre as imagens adjacentes de 80% (lateral e longitudinal).

Para o processamento foi utilizado o software *APS* da *Menci software SRL* (2018), voltado para mapeamento aerofotogramétrico tridimensional. Os produtos gerados foram: um MDT com resolução espacial de 2,50 metros e um ortofotomosaico

(Figura 15) com resolução espacial de 0,10 metros, ambos com Datum SIRGAS 2000 e sistema de projeção UTM, fuso 23 Sul.

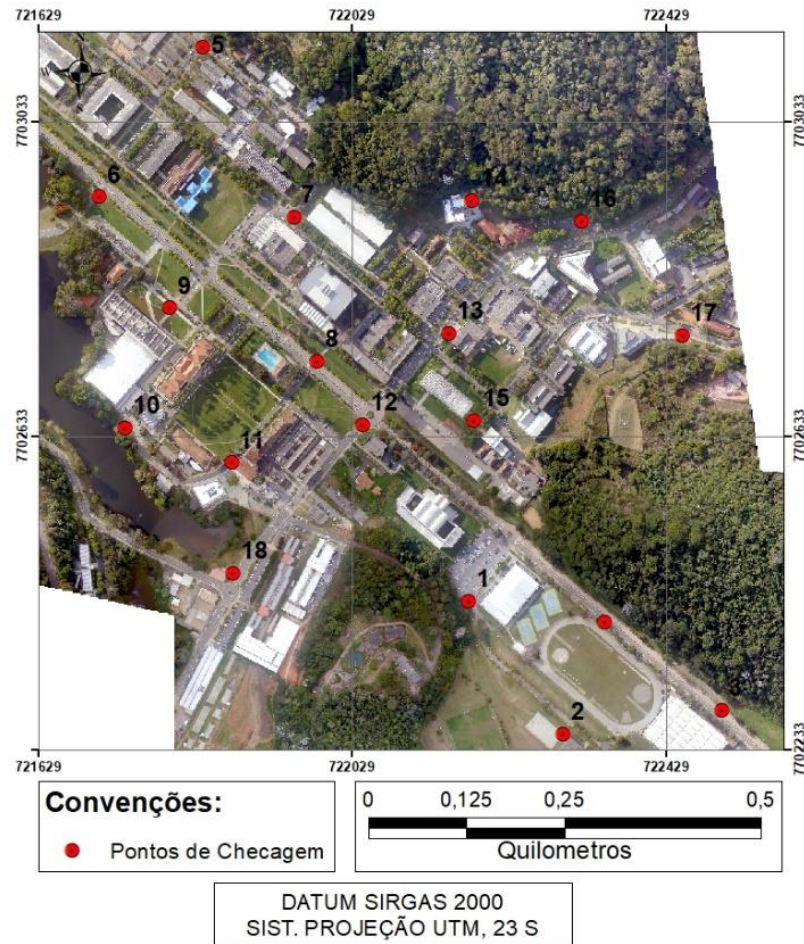
Figura 15 - Produtos gerados pelo VANT (à esquerda, o MDT, e à direita, o ortofotomosaico)



Fonte: Elaborada pelo autor

Com o intuito de testar a qualidade posicional do produto gerado, realizou-se a avaliação da sua acurácia, sendo a região de maior interesse a parte central do *campus*. Para isso, foi realizada uma coleta de 18 pontos de referência distribuídos, conforme Figura 16.

Figura 16 - Distribuição dos pontos de referência na ortoimagem



Fonte: Elaborada pelo autor

As coordenadas de referência foram definidas em pontos notáveis em campo e no produto. Para isso, foram utilizadas as quinas do meio fio nas ruas e dos estacionamentos, distribuídos pelo *campus* universitário.

Foi realizada a análise do padrão de distribuição espacial das amostras de checagem apenas sobre a área de estudo, conforme descrito no tópico 4.4. Nesse caso, as amostras apresentaram um padrão disperso sobre a área de estudo.

Os pontos de checagem foram coletados com GNSS RTK (*Real Time Kinematic*) JAVAD, utilizando o método de posicionamento Estático Rápido com tecnologia NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*), tendo um tempo médio de rastreamento de cinco segundos. As precisões planimétricas variaram de 0,005 metros a 0,028 metros, e as precisões altimétricas variaram de 0,007 metros a 0,033 metros.

Novamente, foi aplicada a detecção de *outliers* e a tendência analisada pelo teste *t* de *Student*.

Por fim, realizou-se a classificação do produto cartográfico, segundo o EPSI, comparando com a metodologia da Propagação de Variância, proposta por Santos (2015), com a metodologia tradicional, da proposta pela ET-CQDG (2016), para avaliar o comportamento dos resultados.

5.3.4 Estudo de caso 3: aplicação do método proposto na avaliação de um MDS híbrido utilizando imagens do sensor PRISM/ALOS

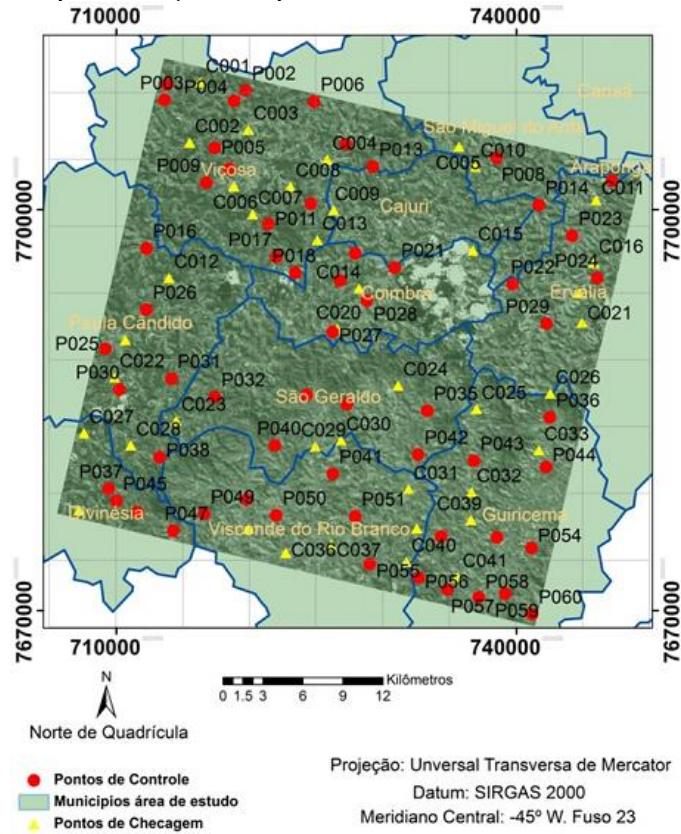
Neste exemplo prático avaliou-se a qualidade de um modelo digital de superfície (MDS) obtido a partir de pares estereoscópicos do sensor PRISM do satélite ALOS.

Segundo Jaxa (2018), o sensor PRISM possui três sistemas óticos CCD de visualização simultâneas, sendo um deles a nadir, outro inclinado $+24^\circ$ para frente (*forward*) e o último inclinado -24° para trás (*backward*). Essa combinação possibilita a aquisição de pares estereoscópicos ao longo de sua trajetória, e gera MDS com acurácia altimétrica de, aproximadamente, um metro.

Para este exemplo, utilizou-se um MDS híbrido, gerado por Egg *et al.* (2013), utilizando pares estereoscópicos da combinação das diferentes visadas do sensor PRISM, nadir (N), frente ou vante (F) e atrás ou ré (B).

A área de estudo compreende, aproximadamente, 1.230 km², entre os municípios de Araponga, Cajuri, Canãa, Coimbra, Divinésia, Ervália, Guiricema, Paula Cândido, São Geraldo, São Miguel do Anta, Viçosa e Visconde do Rio Branco, conforme Figura 17.

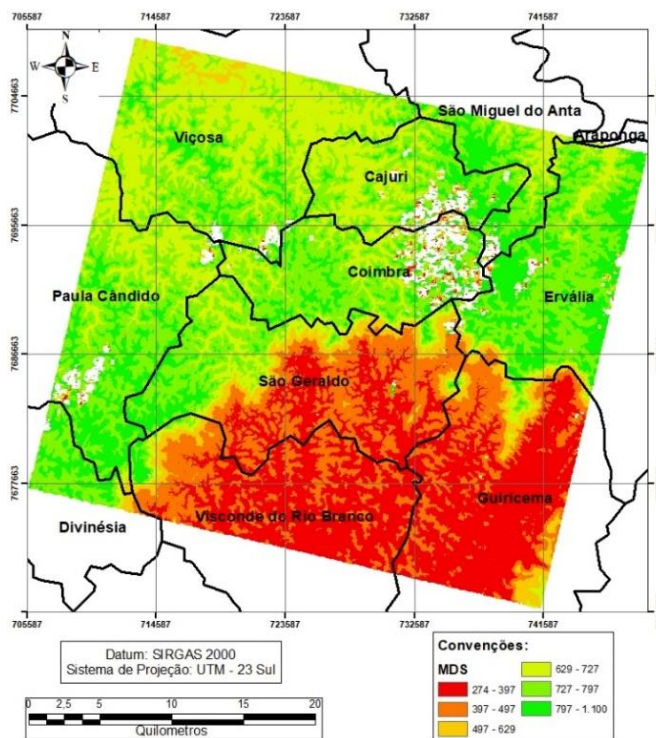
Figura 17 - Espacialização dos pontos de controle e referência na imagem



Fonte: Egg *et al.* (2013)

O MDS híbrido gerado está apresentado na Figura 18.

Figura 18 - MDS composto gerado



Fonte: Adaptado Egg *et al.* (2013)

As regiões com tonalidade branca no MDS são locais com excesso de nuvens, não sendo possível a geração da informação altimétrica.

Foram utilizados 19 pontos de checagem para verificar a qualidade posicional do produto cartográfico tridimensional.

Primeiramente, foram calculadas as discrepâncias altimétricas nos pontos de referência em relação aos pontos homólogos no MDS. Para a avaliação da planimetria, utilizou-se a ortoimagem, gerada pelo MDS e pela imagem (visada nadir) do sensor PRISM

Em seguida, realizou-se, nas discrepâncias, o teste de detecção de *outliers* e o teste de detecção de tendência por meio do teste *t* de *Student*.

De acordo com resultados de Egg *et al.* (2013), o produto cartográfico apresentou Classe A, para a escala de 25.000 em ambos os casos (planimetria e altimetria), atestando a qualidade geométrica das imagens do sensor PRISM, em conformidade ao apresentado pela Jaxa (2018). Ressaltando que no trabalho de Egg *et al.* (2013) foram utilizados 30 pontos de checagem, para este trabalho foram disponibilizados apenas 19 pontos.

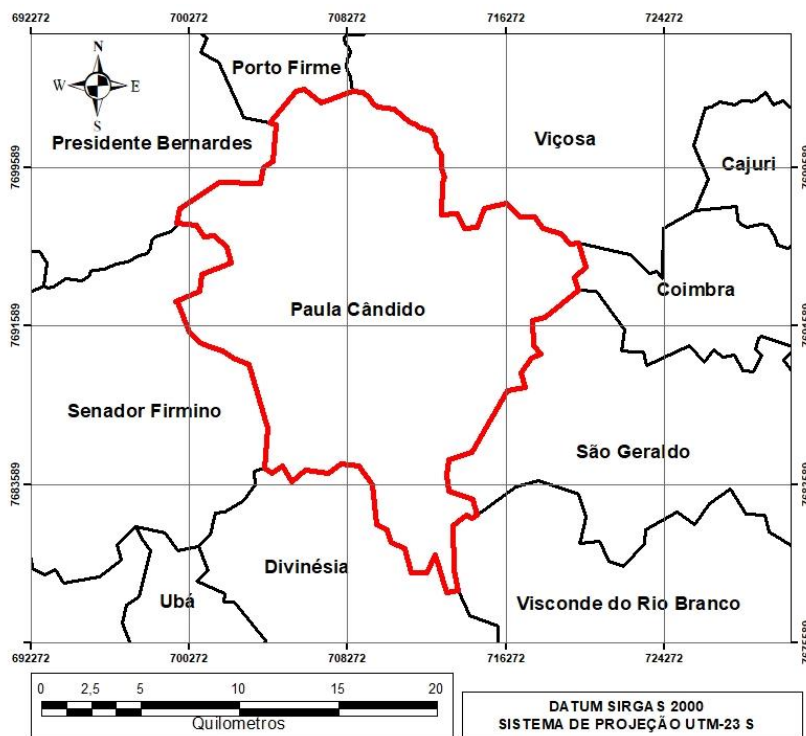
5.3.5 Estudo de caso 4: utilização da orientação do método proposto para a classificação do produto cartográfico

Conforme proposto neste trabalho, utilizou-se a orientação do Elipsoide de Incertezas a partir da MVC dos pontos de referência, a fim de verificar se ela poderia influenciar na avaliação da acurácia posicional em produtos cartográficos tridimensionais.

Para isso, avaliou-se a qualidade posicional do mosaico de imagens do Google Earth do município de Paula Cândido-MG para avaliar a qualidade posicional dos produtos gerados nesta plataforma. Utilizou-se a forma tradicional de avaliação comparando com o método proposto do Elipsoide de Incertezas, bem como sua orientação espacial dada a partir das coordenadas de referência.

Neste trabalho, a área de estudo selecionada foi o município de Paula Cândido, localizado na Zona da Mata do Estado de Minas Gerais, que possui uma área de 268,74 km², delimitada pelas latitudes 20°45'18"S e 20°59'08"S, e pelas longitudes 43°08'55"W e 42°52'56"W, conforme Figura 19.

Figura 19 - Localização da área de estudo do município de Paula Cândido

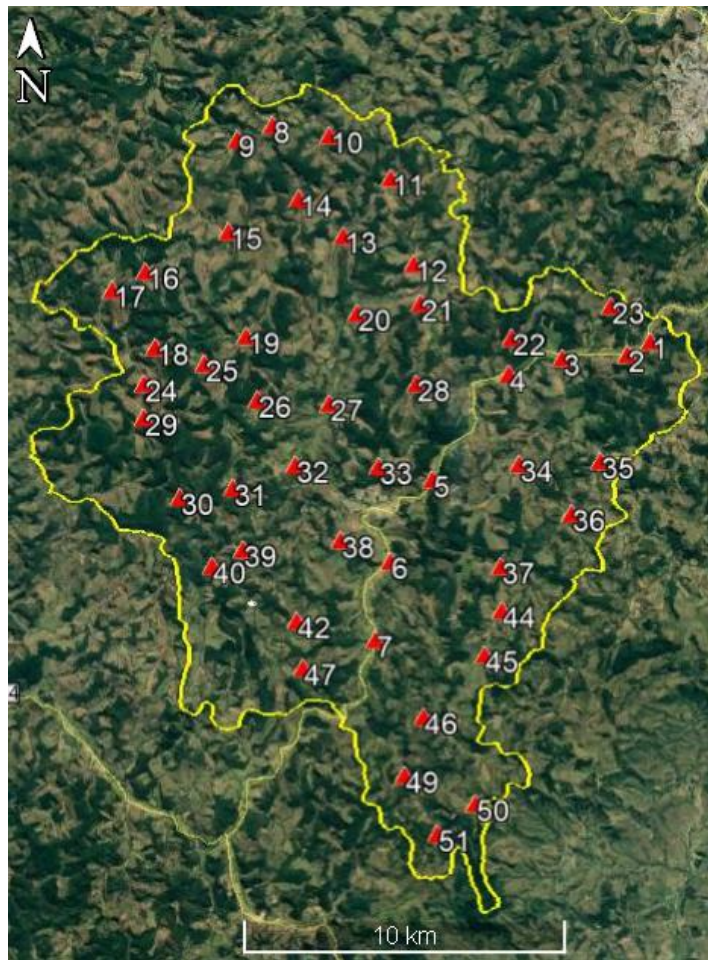


Fonte: Elaborada pelo autor

Para o desenvolvimento deste estudo, foi utilizado um mosaico de imagens datadas de agosto de 2014 a maio de 2017, obtidas pelo *Google Earth* do município de Paula Cândido-MG.

Foi utilizado o *software* ArcGIS v.10.5 para o planejamento da distribuição das amostras e análise da distribuição espacial. Para a definição dos pontos de controle, seguiu-se a metodologia proposta pelo IBGE (2009), em que são utilizados pontos de entroncamento de estradas. Nesse caso, foram utilizados 50 pontos de referência, distribuídos pelo município, conforme Figura 20.

Figura 20 - Distribuição dos pontos de controle ao longo do município de Paula Cândido



Fonte: Elaborada pelo autor

Os pontos de referência foram coletados com receptor GNSS da marca TopoMap, modelo T10 de dupla frequência. O posicionamento foi realizado pelo método relativo estático com tempo de rastreamento de 20 minutos. Foi utilizada como base a estação VICO situada na cidade de Viçosa-MG, pertencente à RBMC-IBGE (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS). O processamento dos dados foi efetivado no *software* Topcon Tools 7.5.1. A maior linha de base utilizada foi da ordem de 25 km. A precisão posicional planimétrica, obtida no levantamento, apresentou valores de 1 cm a 33 cm, e a altimétrica variou de 10 cm a 62 cm.

Tanto as coordenadas do mosaico do *Google Earth* quanto dos pontos de verificação se encontram referenciadas ao Datum WGS84, com sistema de projeção UTM do fuso 23 Sul.

Por fim, realizou-se a classificação segundo o método do EPSI, comparando com a metodologia proposta por Santos (2015), da propagação da variância, e com a metodologia proposta pela ET-CQDG (2016), classificação tradicional, para avaliar o comportamento dos resultados.

Também foi comparado o efeito da orientação do Elipsoide de Incertezas classificação. Para isto, utilizou-se a MVC de cada ponto de referência, utilizado para a avaliação da qualidade posicional. Esta matriz é gerada no processamento dos pontos, em que são obtidas as precisões de cada componente posicional (E, N, h).

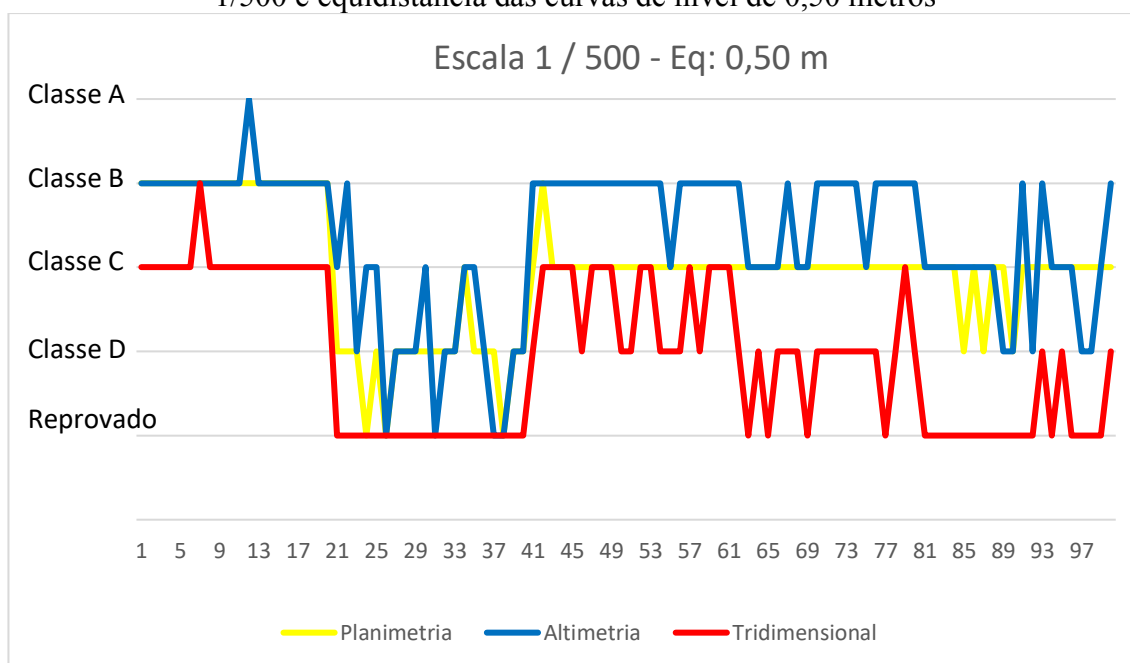
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Resultados e discussões dos dados simulados

Os resultados das simulações estão apresentados em forma de gráficos, em que o eixo das abcissas representa o conjunto de dados simulados, e o eixo das ordenadas, o resultado de sua classificação, conforme ET-CQDG (2016) para a planimetria e altimetria, juntamente com EPSI para o caso tridimensional. Lembrando que foram testadas nove classes, sendo que, para cada classe, foram gerados 100 conjuntos de dados, e que cada conjunto de dados possuía 30 discrepâncias, o que totalizou 27.000 discrepâncias distintas para cada classe.

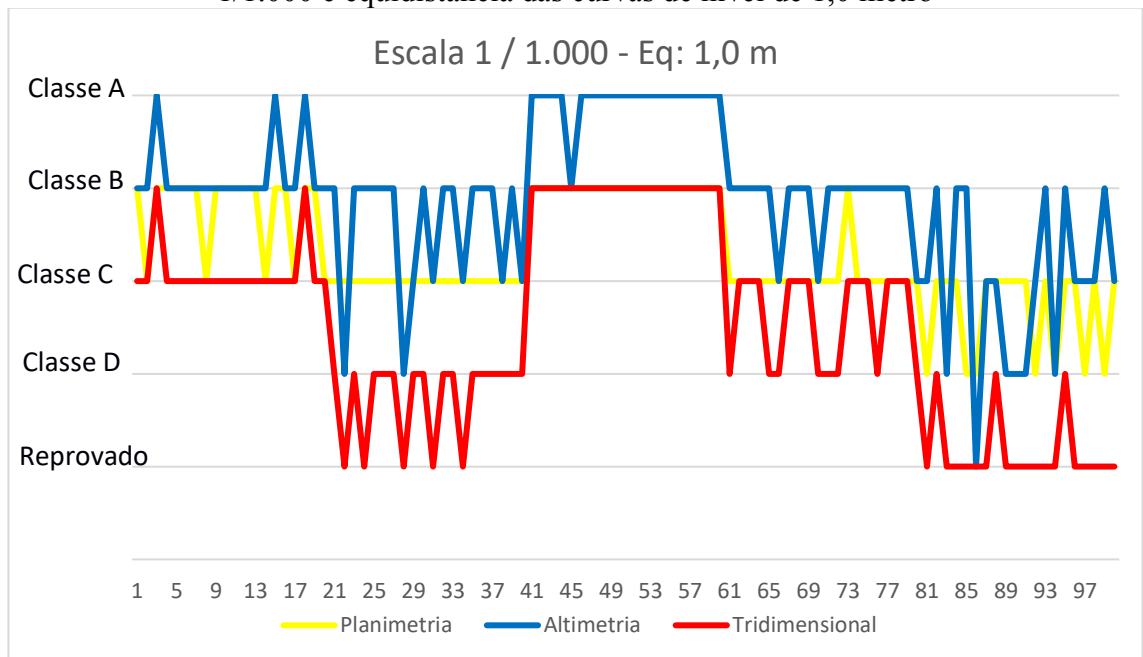
A seguir, serão apresentados os resultados das classificações planimétrica (amarelo), altimétrica (azul) e tridimensional com o Elipsoide de Incertezas (vermelho), para as diferentes escalas testadas (Figuras 21 a 29). A tabela 3 é apresenta um resumo dos resultados referentes aos dados simulados.

Figura 21 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/500 e equidistância das curvas de nível de 0,50 metros



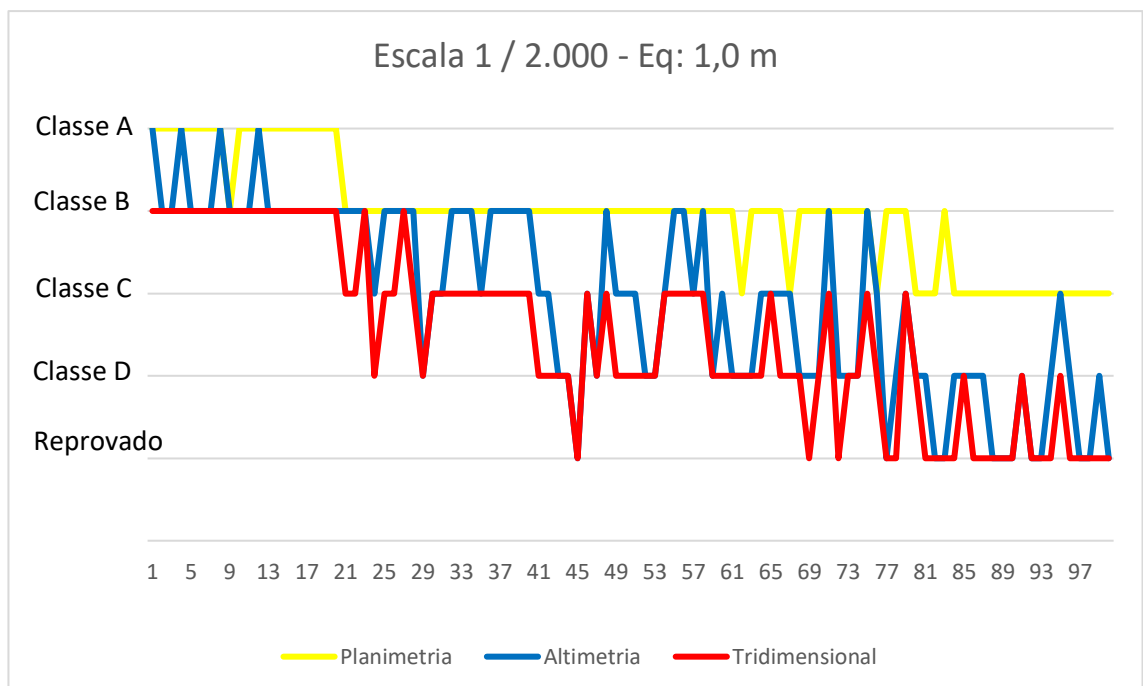
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 22 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/1.000 e equidistância das curvas de nível de 1,0 metro



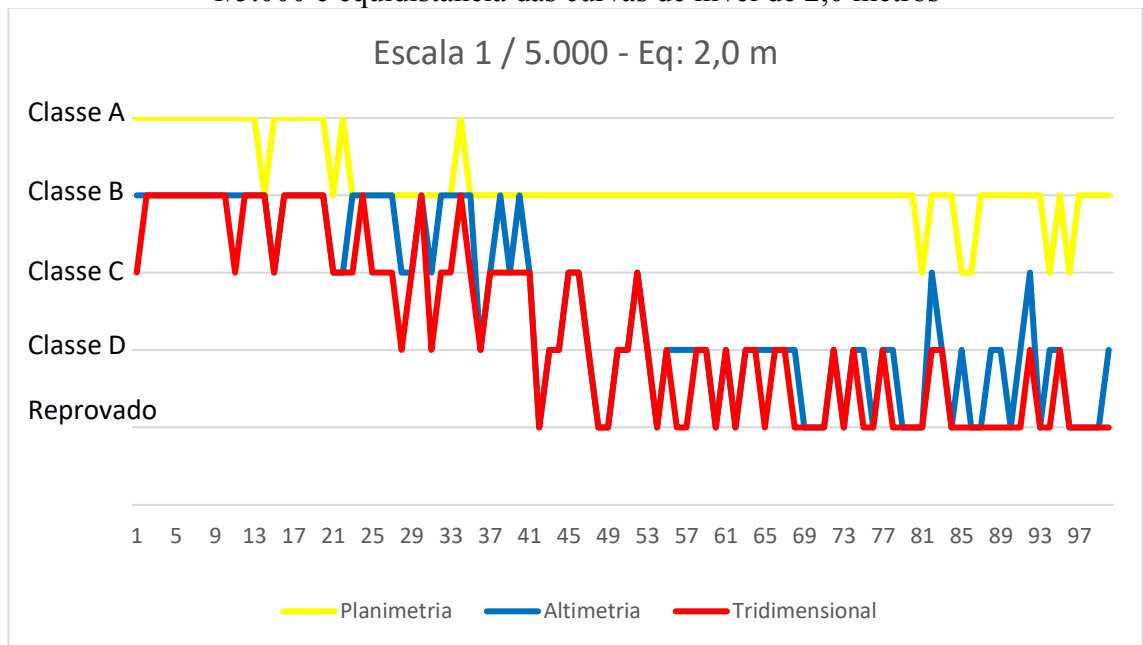
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 23 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/2.000 e equidistância das curvas de nível de 1,0 metro



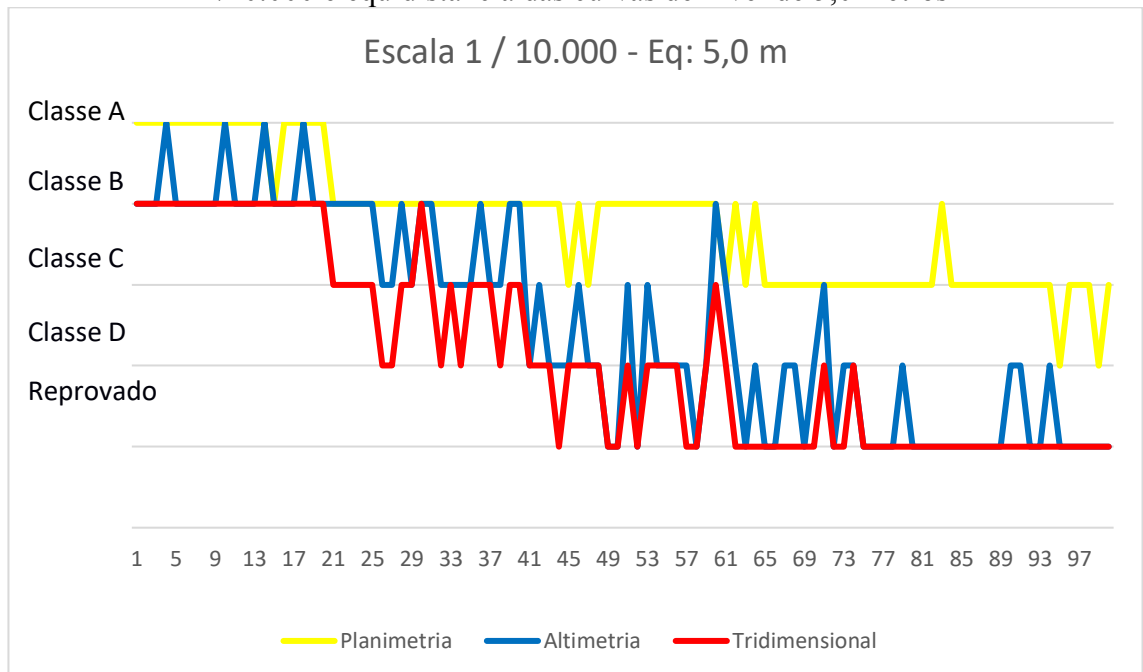
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 24 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/5.000 e equidistância das curvas de nível de 2,0 metros



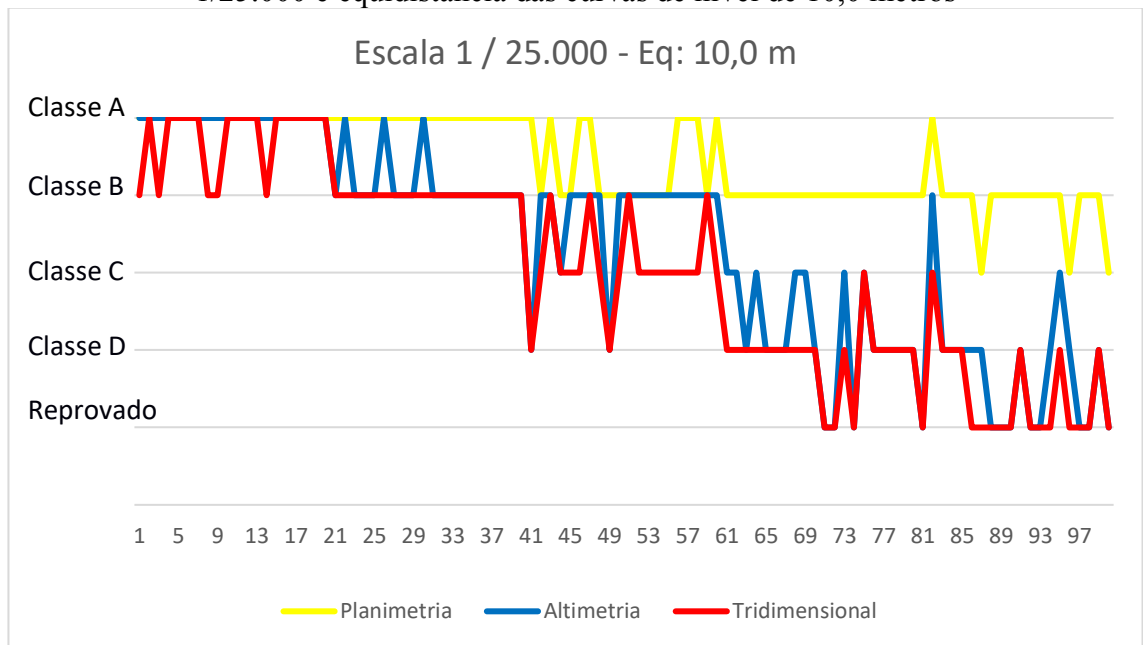
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 25 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/10.000 e equidistância das curvas de nível de 5,0 metros



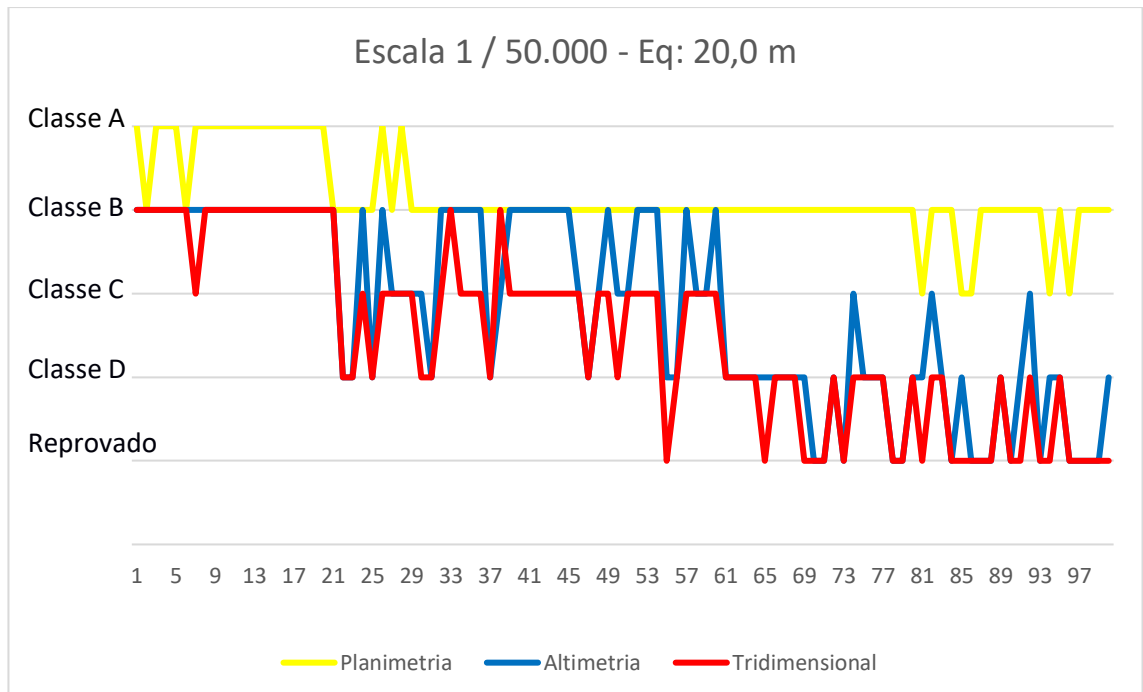
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 26 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/25.000 e equidistância das curvas de nível de 10,0 metros



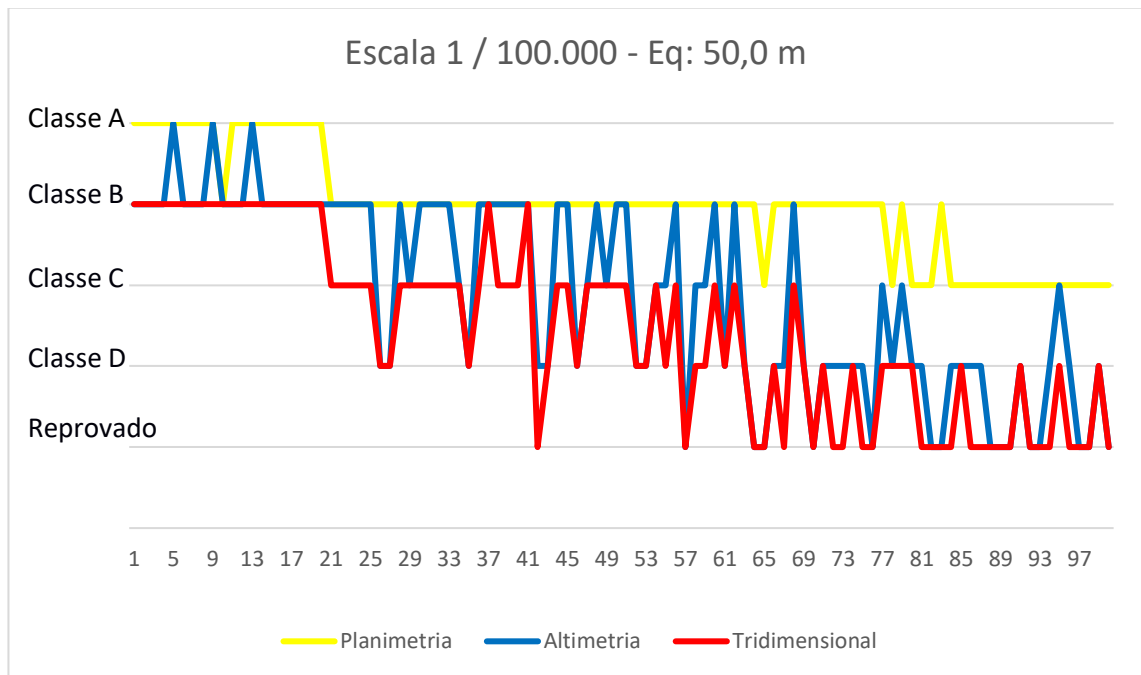
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 27 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/50.000 e equidistância das curvas de nível de 20,0 metros



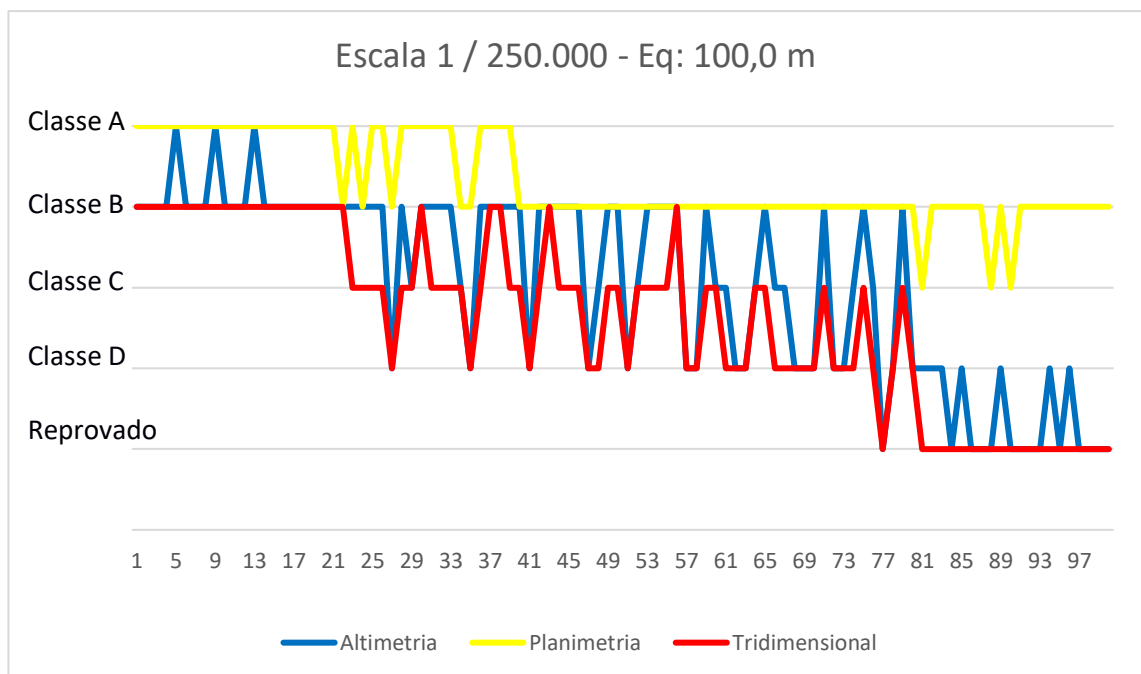
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 28 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/100.000 e equidistância das curvas de nível de 50,0 metros



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 29 - Comportamento da classificação dos dados simulados para a escala de 1/250.000 e equidistância das curvas de nível de 100,0 metros



Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 3 - Resumo dos dados simulados.

Escala	PLANIMETRIA		ALTIMETRIA	
	Mais Restritivo	Mesma Classificação	Mais Restritivo	Mesma Classificação
1 / 500 - Eq: 0,50 m	62	38	98	2
1 / 1.000 - Eq: 1,00 m	62	38	98	2
1 / 2.000 - Eq: 1,00 m	97	3	45	55
1 / 5.000 - Eq: 2,00 m	97	3	27	73
1 / 10.000 - Eq: 5,00 m	98	2	38	62
1 / 25.000 - Eq: 10,00 m	98	2	33	67
1 / 50.000 - Eq: 20,00 m	98	2	33	67
1 / 100.000 - Eq: 50,00 m	98	2	43	57
1 / 250.000 - Eq: 100,00 m	97	3	41	59

Fonte: Elaborada pelo autor

Ao analisar os resultados (Tabela 3 e Figuras 21 à 29), em relação a planimetria percebe-se que a metodologia do EPSI apresentou ser mais restritiva em 89,7% dos casos simulados. Já em relação a altimetria o EPSI apresentou ser mais restritivo 50,7% dos casos simulados. No restante dos casos a metodologia do EPSI apresentou a mesma classificação nas duas situações analisadas (planimetria e altimetria).

Verificando os resultados simulados e analisando as equações do método proposto (Equação 33 e Equação 34) percebe-se que a classificação com a metodologia proposta será mais restritiva ou apresentará a mesma classificação. Isso indica que ao utilizar o EPSI para classificar um produto cartográfico tridimensional seu resultado nunca será pior que o tradicionalmente utilizado.

Porém, deve se atentar ao fato das tolerâncias planimétricas e altimétricas serem compatíveis ao tipo do produto. Em casos onde a escala e a equidistância das curvas de nível não são compatíveis ao produto testado, os resultados tendem a seguir o comportamento da tolerância com o maior peso.

Para avaliar o peso das tolerâncias utilizadas, elaborou-se uma tabela que apresenta uma relação entre a tolerância planimétrica e altimétrica (tol_{2D}/tol_Z). Para isso dividiu-se a tolerância planimétrica pela tolerância altimétrica, para a classe A de todas as escalas estudadas. Na tabela 4 estão apresentados os resultados desta relação entre as tolerâncias.

Tabela 4 - Relação entre as tolerâncias planimétricas e altimétricas

ESCALA	Equidistância das curvas de nível (m)	PEC(m) _{Plan}	EP(m) _{Plan}	PEC(m) _{Alt}	EP(m) _{Alt}	PEC _{Plan} / PEC _{Alt}	EP _{Plan} / EP _{Alt}
1/500	0,5	0,14	0,09	0,14	0,08	1,0	1,0
1/1.000	1,0	0,28	0,17	0,27	0,17	1,0	1,0
1/2.000	1,0	0,56	0,34	0,27	0,17	2,1	2,0
1/5.000	2,0	1,40	0,85	0,54	0,33	2,6	2,6
1/10.000	5,0	2,80	1,70	1,35	0,83	2,1	2,0
1/25.000	10,0	7,00	4,25	2,70	1,67	2,6	2,6
1/50.000	20,0	14,00	8,50	5,40	3,33	2,6	2,6
1/100.000	50,0	28,00	17,00	13,50	8,33	2,1	2,0
1/250.000	100,0	70,00	42,50	27,00	16,67	2,6	2,6

Fonte: Elaborada pelo autor

Ao verificar os resultados da Tabela 4 percebe-se que, para as escalas testadas, as escalas maiores (1 / 500 – Eq: 0,50 m e 1 / 1.000 – Eq: 1,00 m) as tolerâncias apresentaram uma relação de 1 (um) para 1 (um), ou seja, a tolerância planimétrica e altimétrica apresentam o mesmo peso na classificação. Já nas escalas menores 1 / 2.000 – Eq: 1,00 m; 1 / 5.000 – Eq: 2,00 m; 1 / 10.000 – Eq: 5,00 m; 1 / 25.000 – Eq: 10,00 m; 1 / 50.000 – Eq: 20,00 m; 1 / 100.000 – Eq: 50,00 m e 1 / 250.000 – Eq: 100,00 m) a relação entre as tolerâncias planimétrica e altimétrica dobra. Nas escalas menores a relação das tolerâncias planimétricas e altimétricas é de, aproximadamente, 2 (dois) para 1 (um), ou seja, a tolerância altimétrica é metade da tolerância planimétrica.

Comparando os resultados dos dados simulados, obtidos na Tabela 3, com a relação entre as tolerâncias, obtido na Tabela 4. Observa-se que de fato nas escalas maiores (1 / 500 – Eq: 0,50 m e 1 / 1.000 – Eq: 1,00 m) a planimetria influenciou mais nos resultados, visto que nestas escalas a planimetria apresentou a mesma classificação em cerca de 40% dos casos. Analisando os gráficos das escalas maiores (Figura 21 e Figura 22) e comparando os resultados, percebe-se um comportamento da classificação do EPSI similar a classificação da planimetria. Nestes casos a altimetria não influenciou tanto quanto a planimetria na classificação.

Porém nas escalas menores (1 / 2.000 – Eq: 1,00 m; 1 / 5.000 – Eq: 2,00 m; 1 / 10.000 – Eq: 5,00 m; 1 / 25.000 – Eq: 10,00 m; 1 / 50.000 – Eq: 20,00 m; 1 / 100.000 – Eq: 50,00 m e 1 / 250.000 – Eq: 100,00 m) comparando os resultados da Tabela 3 com a Tabela 4, percebe-se que ocorreu o contrário em relação as escalas maiores. Visto que nestas escalas a tolerância altimétrica influenciou mais na classificação do que a

tolerância planimétrica. Isto se dá pelo fato de que as tolerâncias estão no denominador das Equações 30 e 31, que definem a metodologia, ou seja, as grandezas são inversamente proporcionais, quanto maior a tolerância menor a influência na classificação.

Assim, para pequenas escalas, obteve-se um fator de 2/1 entre a planimetria/altimetria. Como a planimetria tem uma maior proporção sua influência será menor, com isso a planimetria foi mais restritiva e a altimetria apresentou maior percentual de resultados similares ao EPSI.

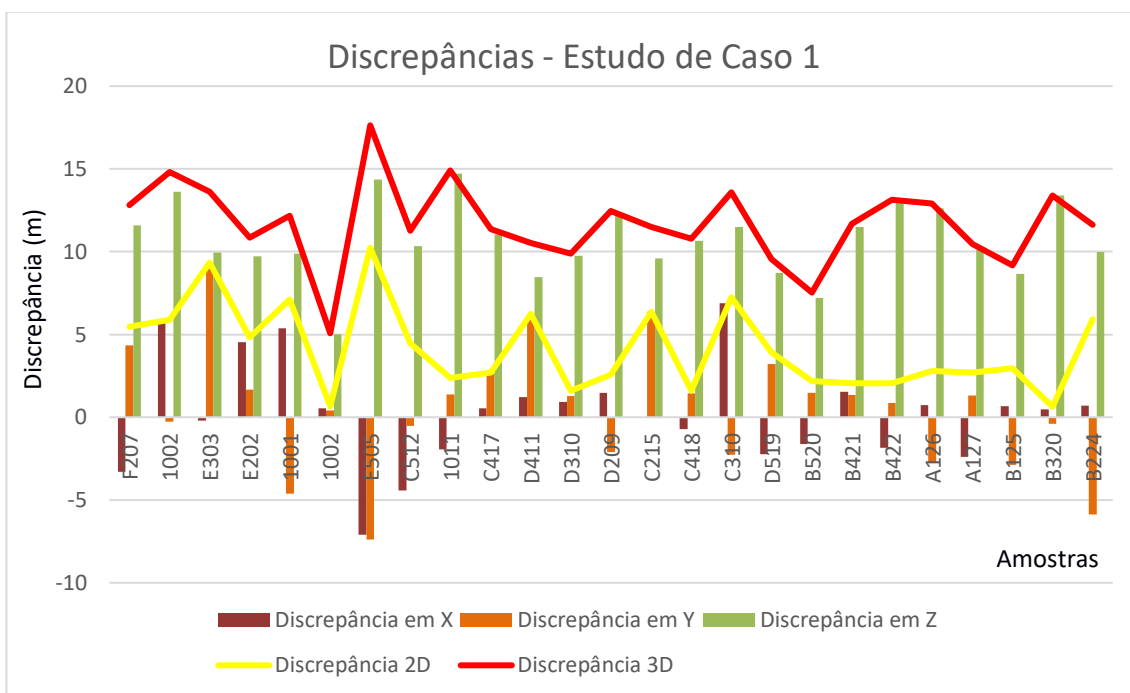
Analisando os gráficos dos dados simulados para as escalas menores (Figuras 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29) observa-se que o comportamento da classificação com o EPSI se assemelha ao comportamento da classificação altimétrica, evidenciando o fato de que as menores tolerâncias influenciam mais na classificação que as maiores tolerâncias.

6.2 Resultados e discussões do estudo de caso 1

Realizando o teste prático sobre os produtos do satélite ALOS, primeiramente, calcularam-se as discrepâncias entre os pontos de teste e de referência, para cada uma das componentes (X, Y, Z), como descrito nas Equações 2, 3 e 6. As discrepâncias planimétricas foram calculadas conforme Equação 4 e as discrepâncias tridimensionais (d_{3D}) foram calculadas utilizando a resultante da discrepância planimétrica com a discrepância altimétrica, conforme equação 42. A seguir, estão apresentados, na Figura 30, os valores das discrepâncias em cada componente, a discrepâncias planimétricas e a discrepância tridimensionais.

$$d_{3Di} = \sqrt{d_{xi}^2 + d_{yi}^2 + d_{zi}^2} \quad (42)$$

Figura 30 - Discrepâncias dos pontos de referência na avaliação da ortoimagem ALOS/PRISM e MDS SRTM

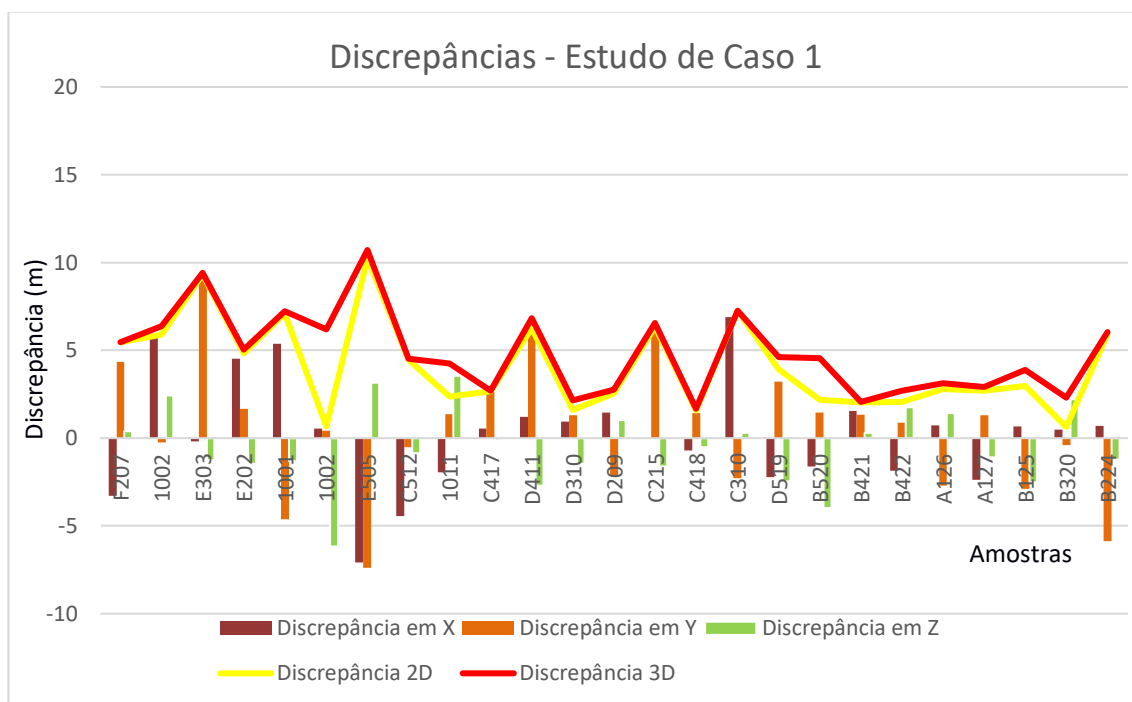


Fonte: Elaborada pelo autor

O produto apresentou média na discrepância X de 0,229 metros; discrepância média em Y de 0,485 metros e discrepância média em Z de 10,643 metros. O RMS da amostra de discrepância nas componentes X, Y e Z de 3,053 m, 3,693 m e 10,864 m respectivamente.

Após calculadas as discrepâncias, realizaram-se os testes de tendência e de detecção *outliers*, descritos no tópico 4.4. Não foram detectados *outliers*, porém foi detectada uma tendência nas discrepâncias altimétricas ($t_{tab} = 1,708$; $t_{calc} = 24,385$). A mesma foi corrigida por meio da translação das coordenadas altimétricas de referência, tendo como módulo o valor da média das discrepâncias e direção oposta à média, ou seja, foi subtraído 10,864 metros à componente altimétrica das coordenadas do produto teste. Não foi necessária a translação nas outras componentes. A nova média da discrepância na altimetria foi de -0,221 e o RMS de 2,193 metros. A seguir, na Figura 31, estão apresentados os novos valores de discrepância das coordenadas.

Figura 31 - Discrepâncias corrigida do efeito sistemático na altimetria dos pontos de referência na avaliação da ortoimagem ALOS/PRISM e MDS SRTM



Fonte: Elaborada pelo autor

Primeiramente, realizou-se a classificação do produto para a escala 1/50.000 e equidistância das curvas de nível de 20 metros. A seguir, são apresentados os resultados da classificação, segundo o método proposto do EPSI (Tabela 5), segundo Santos (2015) com a propagação de variâncias (Tabela 6), e segundo a ET-CQDG (2016) (Tabela 7).

Tabela 5-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/50.000 e Eq. 20 m, na avaliação da ortoimagem ALOS/PRISM e MDS SRTM

Classes	PEC (%)	EP (RMS)	RESULTADOS
Classe D	96,3	Atende	Aprovado
Classe C	96,3	Atende	Aprovado
Classe B	96,3	Atende	Aprovado
Classe A	66,7	Não Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 6-Resultado da classificação, segundo a propagação de variâncias para a escala de 1/50.000 e Eq. 20 m, na avaliação da ortomagem ALOS/PRISM e MDS SRTM

CLASSES	PEC (%)	EP (%)	RESULTADOS
Classe D	100,0	100,0	Aprovado
Classe C	100,0	96,0	Aprovado
Classe B	96,3	88,0	Reprovado
Classe A	92,6	0,0	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 7-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/50.000 e Eq. 20 m, na avaliação da ortomagem ALOS/PRISM e MDS SRTM

CLASSES	PLANIMETRIA			ALTIMETRIA		
	PEC (%)	EP	RESULTADOS	PEC (%)	EP (RMS)	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe C	100,0	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe B	96,3	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe A	96,3	Atende	Aprovado	92,6	Atende	Aprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Comparando os resultados da classificação do produto para a escala de 1/50.000 e equidistância das curvas de nível de 20 metros, percebe-se que, utilizando a forma tradicional, o produto apresentou Classe A (tanto para a planimetria quanto para a altimetria); utilizando o método proposto por Santos (2015), o produto apresentou Classe C; e, utilizando o modelo do Elipsoide de Incertezas, o produto apresentou Classe B. Nesse caso, percebe-se que, em ambas as situações, a classificação tridimensional é mais restritiva que a usualmente utilizada. Comparando os modelos tridimensionais, o método proposto por Santos (2015) foi mais restritivo que o do Elipsoide de Incertezas.

Também foi realizada a classificação do mesmo produto para a classe de 1/25.000 e equidistância de 10 metros. A seguir, serão apresentados os resultados das classificações segundo o método proposto do EPSI (Tabela 8), segundo Santos (2015) com a propagação de variâncias (Tabela 9), e segundo a ET-CQDG (2016) (Tabela 10).

Tabela 8-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/25.000 e Eq. 10 m, na avaliação da ortoimagem ALOS/PRISM e MDS SRTM

Classes	PEC (%)	EP (RMS)	RESULTADOS
Classe D	96,3	Atende	Aprovado
Classe C	96,3	Atende	Aprovado
Classe B	96,3	Atende	Aprovado
Classe A	66,7	Não Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 9-Resultado da classificação, segundo a propagação de variâncias para a escala de 1/25.000 e Eq. 10 m, na avaliação da ortoimagem ALOS/PRISM e MDS SRTM

CLASSES	PEC (%)	EP (%)	RESULTADOS
Classe D	100,0	100	Aprovado
Classe C	100,0	96,2	Aprovado
Classe B	96,1	80,7	Reprovado
Classe A	73,1	0,000	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 10-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/25.000 e Eq. 10 m, na avaliação da ortoimagem ALOS/PRISM e MDS SRTM

CLASSES	PLANIMETRIA			ALTIMETRIA		
	PEC (%)	EP	RESULTADOS	PEC (%)	EP	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe C	100,0	Atende	Aprovado	96,2	Atende	Aprovado
Classe B	100,0	Atende	Aprovado	96,2	Atende	Aprovado
Classe A	84,6	Atende	Reprovado	80,8	Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

De acordo com os resultados apresentados, para a escala 1/25.000 e Eq: 10 metros, o produto apresentou Classe B, tanto para a planimetria quanto para a altimetria com a metodologia da ET-CQDG (2016). De acordo com a metodologia proposta por Santos (2015), o produto apresentou Classe C; e, de acordo com a metodologia do Elipsoide de Incertezas, o produto apresentou Classe B. Nessa situação, a metodologia da ET-CQDG (2016) apresentou a mesma classificação que a do Elipsoide de Incertezas. Apenas a metodologia tridimensional de Santos (2015) foi mais restritiva.

Por fim, realizou-se a classificação do mesmo produto para a classe de 1/10.000 e equidistância de 5 metros – mesmo sabendo que essa classe não é indicada para este produto, a intenção deste trabalho foi avaliar o comportamento da classificação. Nesta situação, as discrepâncias apresentaram 2 (dois) *outliers* na planimetria (ponto

E303 e ponto E505), os mesmos foram eliminados das observações e aplicado o teste de tendência que identificou a mesma tendência na altimetria, sendo a mesma corrigida.

Como dito anteriormente, realizaram-se a classificações do produto para a escala de 1/10.000 e Eq: 5 metros, segundo o método proposto do EPSI (Tabela 11), segundo Santos (2015) com a propagação de variâncias (Tabela 12) e segundo a ET-CQDG (2016) (Tabela 13).

Tabela 4-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/10.000 e Eq. 5 m, na avaliação da ortoimagem ALOS/PRISM e MDS SRTM

Classes	PEC (%)	EP (RMS)	RESULTADOS
Classe D	91,7	Não Atende	Reprovado
Classe C	79,2	Não Atende	Reprovado
Classe B	45,8	Não Atende	Reprovado
Classe A	12,5	Não Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 5-Resultado da classificação, segundo a propagação de variâncias para a escala de 1/10.000 e Eq. 5 m, na avaliação da ortoimagem ALOS/PRISM e MDS SRTM

CLASSES	PEC (%)	EP (RMS)	RESULTADOS
Classe D	95,8	0,792	Reprovado
Classe C	95,8	0,541	Reprovado
Classe B	50,0	0,000	Reprovado
Classe A	16,7	0,000	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 6-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/10.000 e Eq. 5 m, na avaliação da ortoimagem ALOS/PRISM e MDS SRTM

CLASSES	PLANIMETRIA			ALTIMETRIA		
	PEC (%)	EP	RESULTADOS	PEC (%)	EP	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado	91,7	Atende	Aprovado
Classe C	100,0	Atende	Aprovado	87,5	Atende	Reprovado
Classe B	70,8	Atende	Reprovado	87,5	Atende	Reprovado
Classe A	54,2	Atende	Reprovado	41,7	Atende	Reprovado

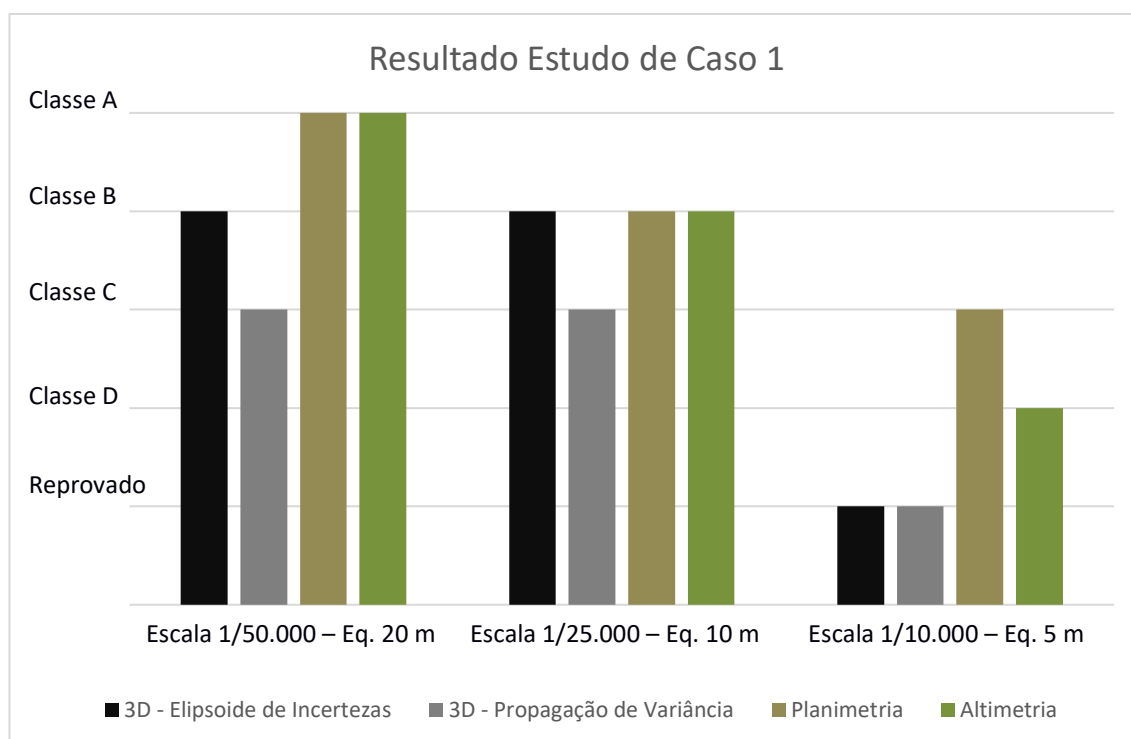
Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados da classificação para a escala de 1/10.000 e Eq. 5 m apresentaram, mais uma vez, que a metodologia da classificação tridimensional é mais restritiva. Seguindo a metodologia da ET-CQDG (2016), o produto apresentou Classe C para a planimetria e Classe D para a altimetria, sendo que, em ambos os casos, onde

utilizou-se a classificação tridimensional, a metodologia do Elipsoide de Incertezas e a metodologia de Santos (2015), o produto foi reprovado para a escala de teste.

A Figura 32 apresenta um resumo da classificação para as três escalas diferentes testadas.

Figura 32 - Resumo dos resultados do estudo de caso 1



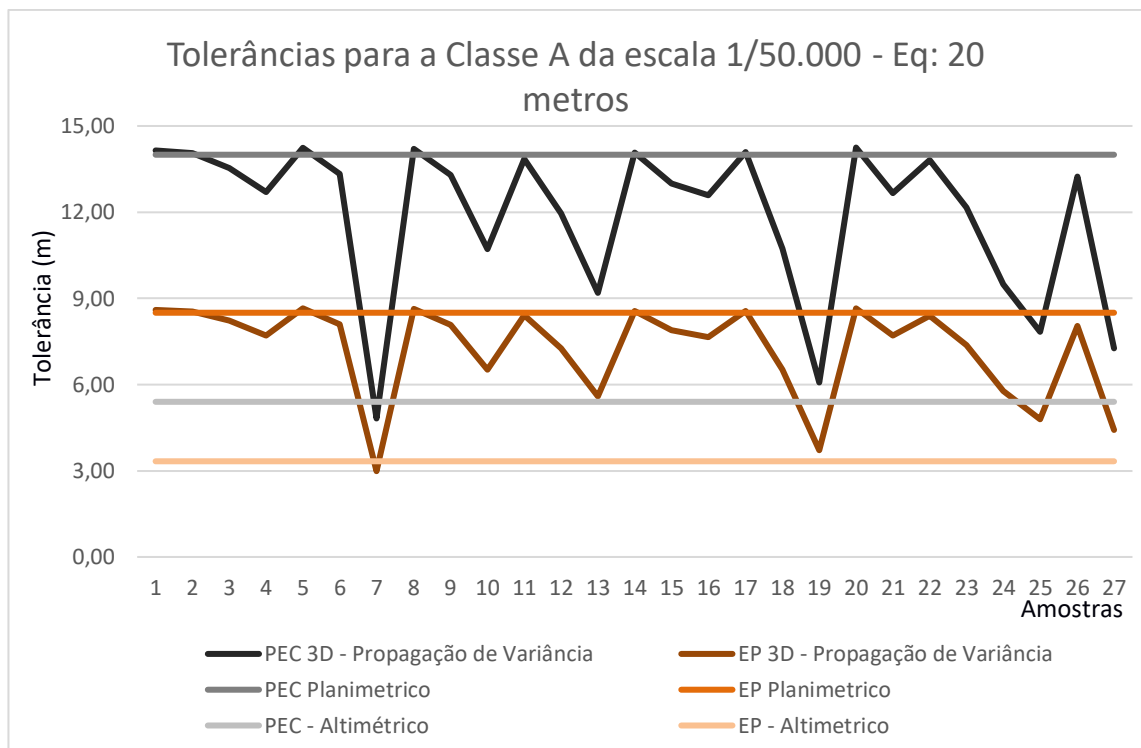
Fonte: Elaborada pelo autor

Ao analisar os resultados, percebe-se que, apesar da classificação do produto na escala 1/25.000 com equidistância das curvas de nível de 10 metros o EPSI ter apresentado a mesma classificação que a metodologia da ET-CQDG (2016), o modelo do EPSI se mostrou mais restritivo que o usualmente aplicado. Comparando os modelos tridimensionais a metodologia da propagação de variância apresentou ser um pouco mais restritiva, em dois dos três casos apresentados, que o EPSI.

Tanto na metodologia da ET-CQDG (2016) quanto na metodologia do EPSI as tolerâncias (PEC e EP) são fixos para a classe e escala de teste, porém na classificação com a propagação e variâncias isso não acontece, pois nesta metodologia, as tolerâncias variam de ponto a ponto.

O gráfico da figura 33 apresenta o comportamento das tolerâncias tridimensionais da metodologia da propagação de variância comparadas com as tolerâncias utilizadas da forma tradicional e do EPSI.

Figura 33 – Comportamento das tolerâncias do Estudo de Caso 1 para a Classe A da escala 1/50.000 e Equidistância das Curvas de nível de 20 metros



Fonte: Elaborada pelo autor

Neste caso a metodologia da propagação de variância apresentou um PEC médio de 11,90 m, e um EP médio de 7,21 m. Apesar destas tolerâncias médias serem inferiores as tolerâncias definidas no Decreto 89.817/84, as mesmas são muito heterogêneas ao longo da classificação, como mostra Figura 33. Houve situações onde as tolerâncias do PEC 3D (14,28 m) foram superiores as tolerâncias do PEC planimétrico (14 m) e PEC altimétrico (5,40 m), ou seja, nesta situação a metodologia é mais rigorosa que a usualmente aplicada. Isso também ocorreu com a tolerância do EP.

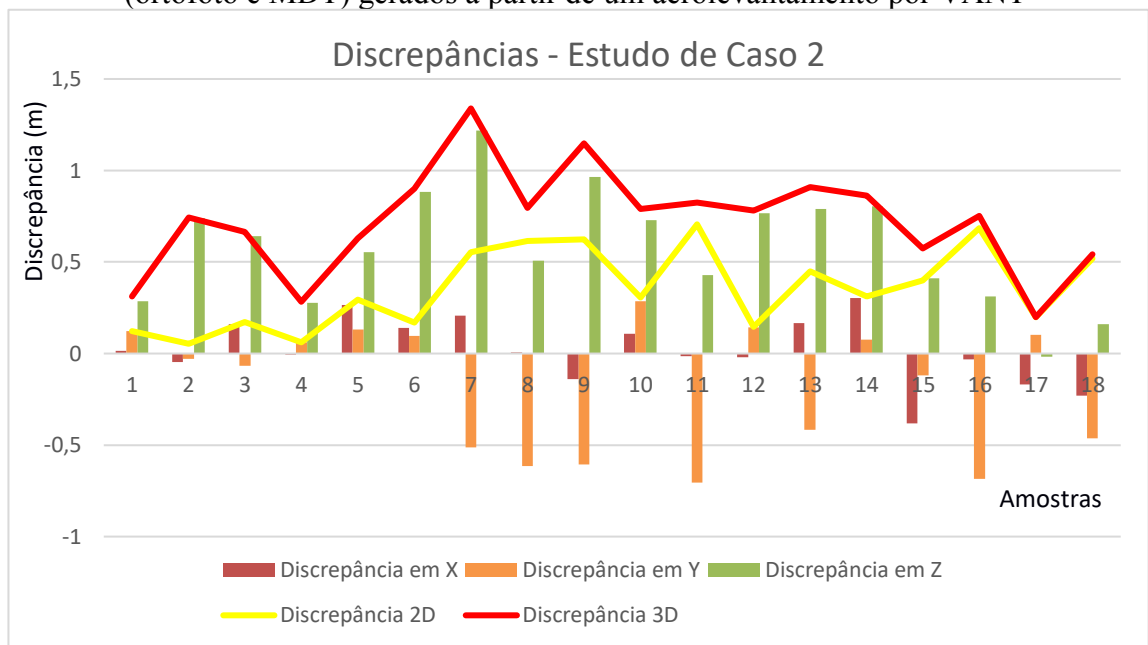
Tanto as tolerâncias do PEC quanto do EP na metodologia da propagação de variância apresentam uma variabilidade muito grande dentro das amostras, já que os valores de discrepância posicionais de cada ponto de checagem participam do modelo que define as tolerâncias do PEC e EP 3D. A aplicação desta metodologia se mostrou mais restritivo em duas das três escalas testadas.

Em uma das três escalas testadas (escala 1/25.000 – Eq: 10 m) o resultado da classificação com o EPSI se mostrou igual a classificação com a ET-CQDG (2016). Ao comparar a Tabela 8 com a Tabela 10, percebe-se que em ambas as condições de classificação (PEC e EP) a metodologia do EPSI rejeitou o produto para a classe A, em contrapartida a metodologia tradicional rejeitou apenas uma das condições. Comparando também a Tabela 8 e 10 com a Tabela 4, percebe-se novamente o comportamento da classificação do EPSI similar a classificação da ET-CQDG (2016) para a altimetria, visto que, nesta escala e equidistância das curvas de nível, a tolerância altimétrica é menor que a tolerância planimétrica.

6.3 Resultados e discussões do estudo de caso 2

Similar ao teste realizado anteriormente, foram comparadas as classificações entre a metodologia da ET-CQDG (2016), a metodologia de Santos (2015) e a metodologia do EPSI, para os produtos (ortofoto e MDT) gerados a partir de um aerolevanteamento por VANT. Para isso, calcularam-se as discrepâncias das componentes, conforme Equações 2, 3 e 6, para os pontos de checagem. Após, calcularam-se as discrepâncias planimétricas e tridimensionais, conforme as equações 4 e 42. Na Figura 33, estão apresentadas as discrepâncias obtidas nestes processos.

Figura 33 - Discrepâncias dos pontos de checagem utilizados na avaliação dos produtos (ortofoto e MDT) gerados a partir de um aerolevantamento por VANT

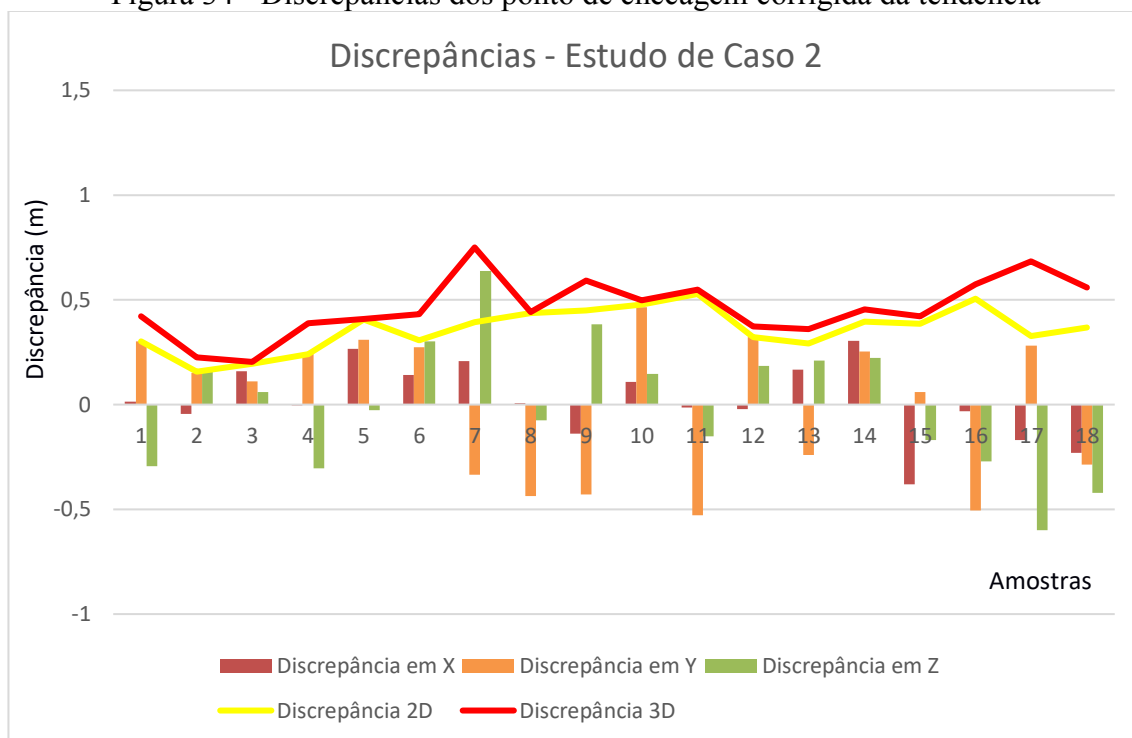


Fonte: Elaborada pelo autor

O produto apresentou média das discrepâncias X de 0,019 metros; discrepância média em Y de -0,178 metros e média das discrepâncias em Z de 0,581 metros; o RMS das discrepâncias nas componentes X, Y e Z iguais a 0,173 metros, 0,376 metros e 0,655 metros, respectivamente.

Não foram detectados nenhum *outlier* na amostra. Após, realizou-se o teste de tendência e foram identificados efeitos sistemáticos na componente Y ($t_{tab} = 1,739$; $t_{calc} = -2,210$) e na componente altimétrica ($t_{tab} = 1,739$; $t_{calc} = 7,860$). Estas foram compensadas transladando o produto no sentido oposto ao valor da média das discrepâncias, ou seja, foram somadas +0,178 metros e -0,581 metros as componente N e Z, respectivamente, das coordenadas do produto teste. Corrigido os efeitos sistemáticos o produto apresentou média das discrepâncias em Y e Z igual a zero e RMS das amostras em Y e Z iguais a 0,331 metros e 0,304 metros, respectivamente. Os resultados das discrepâncias são apresentados na Figura 34.

Figura 34 - Discrepâncias dos ponto de checagem corrigida da tendência



Fonte: Elaborada pelo autor

Após corrigida a tendência, realizou-se a classificação do produto na escala 1/5.000, com equidistância das curvas de nível de 2,00 metros.

Os resultados da classificação do produto, segundo o método proposto do EPSI (Tabela 14), segundo Santos (2015) com a propagação de variâncias (Tabela 15), e segundo a ET-CQDG (2016) (Tabela 16), serão apresentados a seguir.

Tabela 7-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/5.000 e Eq. 2 m, para a ortofoto e MDT VANT

Classes	PEC (%)	EP (RMS)	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado
Classe C	100,0	Atende	Aprovado
Classe B	100,0	Atende	Aprovado
Classe A	100,0	Não Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 8-Resultado da classificação, segundo a propagação de variâncias para a escala de 1/5.000 e Eq. 2 m, para a ortofoto e MDT VANT

CLASSES	PEC (%)	EP (%)	RESULTADOS
Classe D	100,0	100,0	Aprovado
Classe C	100,0	100,0	Aprovado
Classe B	100,0	100,0	Aprovado
Classe A	100,0	100,0	Aprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 9-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/5.000 e Eq. 2 m, para a ortofoto e MDT VANT

CLASSES	PLANIMETRIA			ALTIMETRIA		
	PEC (%)	EP	RESULTADOS	PEC (%)	EP	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe C	100,0	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe B	100,0	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe A	100,0	Atende	Aprovado	90,1	Atende	Aprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Analisando os resultados da classificação do produto para a escala de 1/5.000 e equidistância das curvas de nível de 2 metros, percebe-se que, utilizando a forma tradicional, o produto apresentou Classe A (tanto para a planimetria quanto para a altimetria), e utilizando o método proposto por Santos (2015), o produto também apresentou Classe A. Já utilizando o modelo do Elipsoide de Incertezas, o produto apresentou Classe B. Nesse caso, a metodologia de tridimensional de Santos (2015) resulta na mesma classificação que a metodologia da ET-CQDG (2016), ambos Classe A. O método proposto do EPSI mostrou ser mais restritivo.

Realizou-se também a classificação do mesmo produto para a escala de 1/2.000 com equidistância das curvas de nível de 1,00 metro. Não foi detectado nenhum *outlier*. Novamente classificou-se o produto segundo as metodologias propostas do EPSI (Tabela 17), segundo Santos (2015) com a propagação de variâncias (Tabela 18), e segundo a ET-CQDG (2016) (Tabela 19).

Tabela 10-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/2.000 e Eq. 1 m, para a ortofoto e MDT VANT

Classes	PEC (%)	EP (RMS)	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado
Classe C	88,9	Atende	Reprovado
Classe B	88,9	Não Atende	Reprovado
Classe A	72,2	Não Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 11-Resultado da classificação, segundo a propagação de variâncias para a escala de 1/2.000 e Eq. 1 m, para a ortofoto e MDT VANT

CLASSES	PEC (%)	EP (%)	RESULTADOS
Classe D	100,0	100,0	Aprovado
Classe C	100,0	100,0	Aprovado
Classe B	88,9	77,8	Reprovado
Classe A	66,7	0,0	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 12-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/2.000 e Eq. 1 m, para a ortofoto e MDT VANT

CLASSES	PLANIMETRIA			ALTIMETRIA		
	PEC (%)	EP	RESULTADOS	PEC (%)	EP	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe C	100,0	Atende	Aprovado	94,4	Atende	Aprovado
Classe B	100,0	Atende	Aprovado	94,4	Atende	Aprovado
Classe A	89,3	Atende	Reprovado	55,6	Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

De acordo com os resultados, para a escala 1/2.000 e Eq: 1 metro, a metodologia de classificação tridimensional se mostrou ser mais restritiva. A classificação do produto, segundo a metodologia da ET-CQDG (2016), apresentou Classe B, tanto para a planimetria quanto para a altimetria. A metodologia proposta por Santos (2015) apresentou Classe C. Já a metodologia do Elipsoide de Incertezas apresentou Classe D. Nesse caso, a metodologia do Elipsoide de Incertezas se mostrou mais restritiva que a proposta por Santos (2015).

Seguindo, classificou-se o produto para a Escala de 1/1.000 e Eq: 1 metro. Não foi detectada a presença de *outliers*. O produto foi classificado segundo as metodologias propostas do EPSI (Tabela 20), segundo Santos (2015) com a propagação de variâncias (Tabela 21), e segundo a ET-CQDG (2016) (Tabela 22).

Tabela 20-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/1.000 e Eq. 1 m, para a ortofoto e MDT VANT

Classes	PEC (%)	EP (RMS)	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado
Classe C	88,9	Não Atende	Reprovado
Classe B	66,7	Não Atende	Reprovado
Classe A	11,1	Não Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 13-Resultado da classificação, segundo a propagação de variâncias para a escala de 1/1.000 e Eq. 1 m, para a ortofoto e MDT VANT

CLASSES	PEC (%)	EP (%)	RESULTADOS
Classe D	100,0	100,0	Aprovado
Classe C	88,9	33,3	Reprovado
Classe B	66,7	0,0	Reprovado
Classe A	11,1	0,0	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 14-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/1.000 e Eq. 1 m, para a ortofoto e MDT VANT

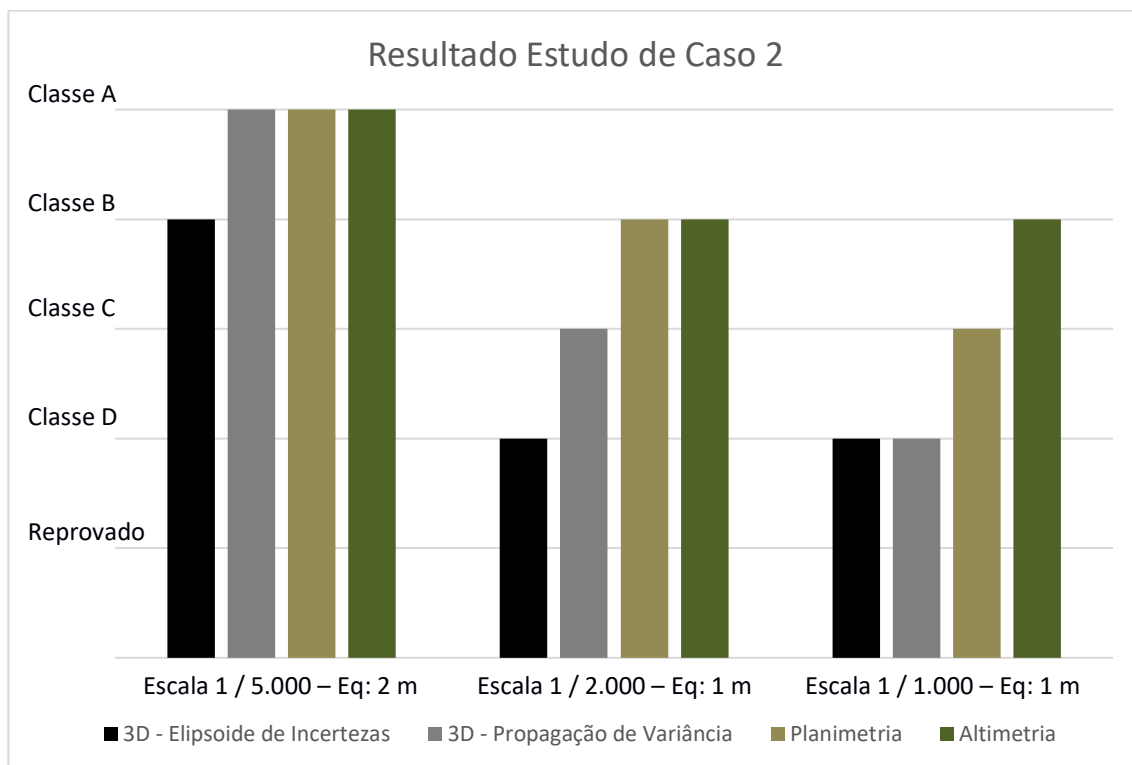
CLASSES	PLANIMETRIA			ALTIMETRIA		
	PEC (%)	EP	RESULTADOS	PEC (%)	EP	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe C	100,0	Atende	Aprovado	94,4	Atende	Aprovado
Classe B	88,9	Atende	Reprovado	94,4	Atende	Aprovado
Classe A	16,7	Atende	Reprovado	55,6	Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados da classificação, para a escala 1/1.000, Eq: 1 metro, foram Classe C para a planimetria e Classe B para a altimetria, segundo a metodologia da ET-CQDG (2016). Segundo a metodologia de Santos (2015) e do Elipsoide de Incertezas, o produto apresentou Classe D.

A seguir, na Figura 35, é apresentado um resumo dos resultados obtidos neste estudo de caso.

Figura 35 - Resumo dos resultados do estudo de caso 2



Fonte: Elaborada pelo autor

Ao interpretar os resultados pode-se perceber que as metodologias de avaliação tridimensionais tendem a ser mais restritivas que a usualmente aplicada.

Comparando os resultados da figura 35 percebe-se que, neste caso, a metodologia do Elipsoide de Incertezas se mostrou mais restritivo que as outras formas de classificação.

Percebe-se também que, comparando com o estudo de caso anterior, para escalas maiores a restritividade do EPSI é mais acentuada. Confrontando as três escalas testadas neste estudo de caso com a tabela 3, percebe-se novamente que em escalas onde a relação das tolerâncias planimétricas e altimétricas é igual a 1 a classificação com o EPSI é mais influenciada pelas tolerâncias planimétricas.

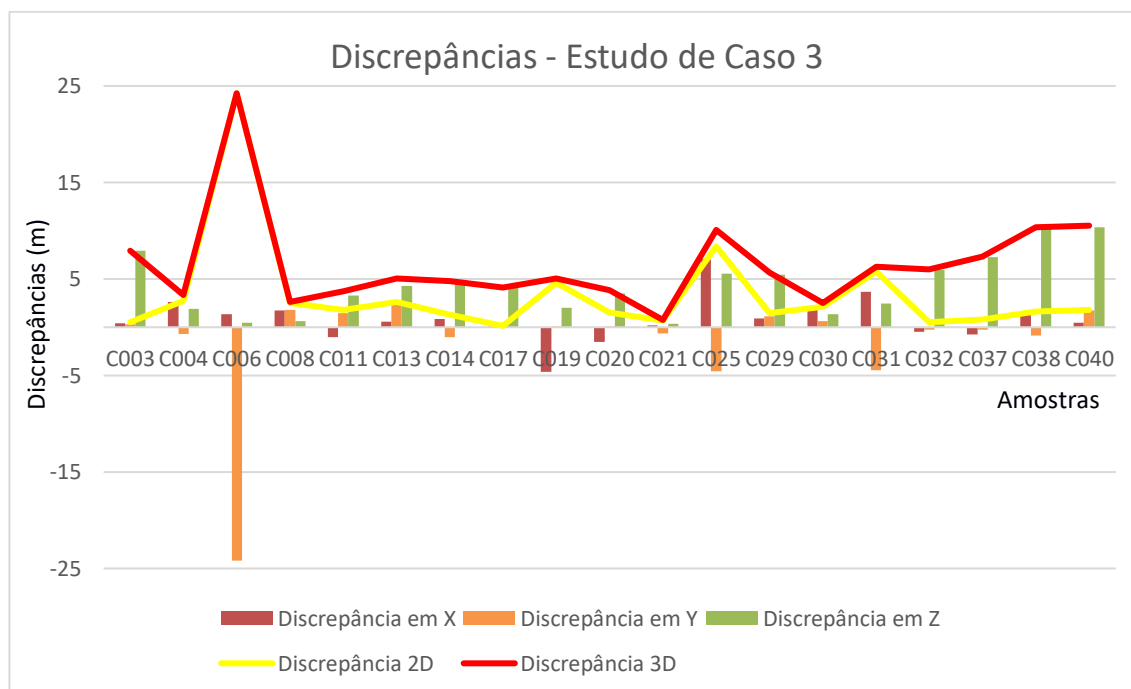
6.4 Resultados e discussões do estudo de caso 3

A partir dos dados de Egg *et al.* (2013), realizou-se a classificação da forma tradicional e com o modelo proposto do MDS composto e da ortoimagem proveniente do sensor PRISM.

Para avaliar a qualidade deste produto, utilizou-se 19 pontos de checagem distribuídos no MDS e na ortoimagem.

Primeiramente, calculou-se as discrepâncias entre os pontos de teste na imagem e seus homólogos de referência levantados em campo. Na Figura 36 estão apresentadas as discrepâncias calculadas, bem como a resultante planimétrica (Equação. 4) e tridimensional (Equação 42).

Figura 36 - Discrepância dos pontos de checagem, utilizados na avaliação da ortofotomaps e MDSALOS/PRISM



Fonte: Elaborada pelo autor

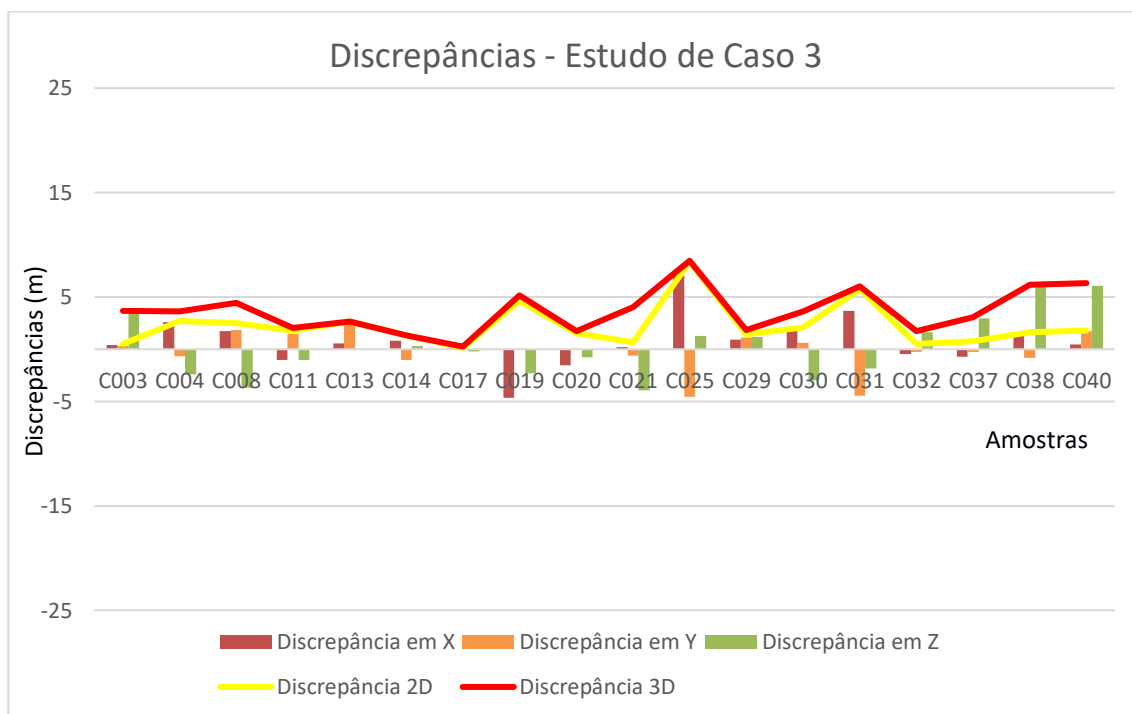
O produto apresentou média na direção X de 0,787 metros; discrepância média em Y de -1,423 metros e média das discrepâncias em Z de 4,304 metros. O RMS das amostras de discrepâncias nas componentes X, Y e Z iguais a 2,388 metros, 5,830 metros e 5,233 metros, respectivamente.

Com as discrepâncias calculadas, aplicou-se o teste de detecção de *outlier*. Foi identificado um *outlier* planimétrico (ponto C006). Sendo o mesmo eliminado do conjunto de amostras.

Após, aplicou-se o teste de detecção de tendência dos dados. Não foi identificado tendência das componentes planimétricas, porém foi identificado um efeito sistemático nas discrepâncias altimétricas ($t_{tab} = 1,734$; $t_{calc} = 6,136$). Para sanar tal situação, realizou-se a translação das coordenadas de teste, com módulo igual à média

das discrepâncias altimétricas e sentido oposto, ou seja, foi somada a componente altimétrica a -5,233 metros (18 pontos de checagem). Na Figura 37 estão apresentadas as discrepâncias dos pontos de checagem, sem o outlier, e minimizados os efeitos sistemáticos.

Figura 37 - Discrepância dos pontos de checagem da avaliação ALOS/PRISM, sem outlier e minimizada dos efeitos sistemáticos



Fonte: Elaborada pelo autor

Com as correções, o produto apresentou média das discrepâncias em X igual a 0,754 metros, discrepância média na componente Y igual a -0,157 metros e média das discrepâncias em Z igual a 0,213 metros. O RMS amostras das componentes X, Y e Z, foram iguais a 2,433 metros, 1,827 metros e 2,920 metros, respectivamente.

De posse das discrepâncias posicionais, realizou-se a classificação do produto para a escala de 1/50.000 e Eq: 20 m, segundo as metodologias propostas do EPSI (Tabela 23), segundo Santos (2015) com a propagação de variâncias (Tabela 24), e segundo a ET-CQDG (2016) (Tabela 25).

Tabela 15-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/50.000 e Eq. 20 m, para o produto ALOS/PRISM

Classes	PEC (%)	EP (RMS)	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado
Classe C	100,0	Atende	Aprovado
Classe B	100,0	Atende	Aprovado
Classe A	50,0	Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 16-Resultado da classificação, segundo a propagação de variâncias para a escala de 1/50.000 e Eq. 20 m, para o produto ALOS/PRISM

CLASSES	PEC (%)	EP (%)	RESULTADOS
Classe D	100,0	100,0	Aprovado
Classe C	100,0	100,0	Aprovado
Classe B	100,0	100,0	Aprovado
Classe A	100,0	66,7	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 17-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/50.000 e Eq. 20 m, para o produto ALOS/PRISM

CLASSES	PLANIMETRIA			ALTIMETRIA		
	PEC (%)	EP	RESULTADOS	PEC (%)	EP	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe C	100,0	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe B	100,0	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe A	100,0	Atende	Aprovado	88,9	Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

De acordo com os resultados, da classificação do produto na escala 1/50.000, Eq: 20 metros, percebe-se que a classificação seguindo a metodologia da ET-CQDG (2016) apresentou Classe A para a planimetria e Classe B para a altimetria. A metodologia de Santos (2015) e do EPSI apresentaram Classe B. Nessa situação, ambos os modelos tridimensionais foram mais restritivos na classificação do que o usualmente aplicado.

Classificou-se também o produto para a escala de 1/25.000, Eq: 10 metros. Aplicou-se o teste de detecção de *outliers*, não sendo encontrado nenhum. Então, classificou-se o produto segundo as metodologias propostas do EPSI (Tabela 26), com a propagação de variâncias (Tabela 27), e segundo a ET-CQDG (2016) (Tabela 28).

Tabela 18-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/25.000 e Eq. 10 m, para o produto ALOS/PRISM

Classes	PEC (%)	EP (RMS)	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado
Classe C	94,4	Atende	Aprovado
Classe B	88,9	Atende	Reprovado
Classe A	38,9	Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 19-Resultado da classificação, segundo a propagação de variâncias para a escala de 1/25.000 e Eq. 10 m, para o produto ALOS/PRISM

CLASSES	PEC (%)	EP (%)	RESULTADOS
Classe D	100,0	100,0	Aprovado
Classe C	100,0	100,0	Aprovado
Classe B	88,9	66,7	Reprovado
Classe A	66,7	5,5	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 20-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/25.000 e Eq. 20 m, para o produto ALOS/PRISM

CLASSES	PLANIMETRIA			ALTIMETRIA		
	PEC (%)	EP	RESULTADOS	PEC (%)	EP	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe C	100,0	Atende	Aprovado	94,4	Atende	Aprovado
Classe B	100,0	Atende	Aprovado	94,4	Atende	Aprovado
Classe A	94,4	Atende	Aprovado	61,1	Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Para a classificação do produto na escala 1/25.000, Eq: 10 metros o produto apresentou Classe A na planimetria e classe B na altimetria, seguindo a metodologia da ET-CQDG (2016), e apresentou Classe C tanto com a metodologia proposta por Santos (2015) quanto com a metodologia do Elipsoide de Incertezas.

O produto também foi classificado na escala 1/10.000, Eq: 5 metros. Sendo, mais uma vez, segundo as metodologias propostas do Elipsoide de Incertezas (Tabela 29), segundo Santos (2015) com a propagação de variâncias (Tabela 30), e segundo a ET-CQDG (2016) (Tabela 31).

Tabela 21-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/10.000 e Eq. 5 m, para o produto ALOS/PRISM

Classes	PEC (%)	EP (RMS)	RESULTADOS
Classe D	77,8	Não Atende	Reprovado
Classe C	61,1	Não Atende	Reprovado
Classe B	38,9	Não Atende	Reprovado
Classe A	22,2	Não Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 30-Resultado da classificação, segundo a propagação de variâncias para a escala de 1/10.000 e Eq. 5 m, para o produto ALOS/PRISM

CLASSES	PEC (%)	EP (%)	RESULTADOS
Classe D	88,9	50,0	Reprovado
Classe C	72,2	38,9	Reprovado
Classe B	50,0	0,0	Reprovado
Classe A	27,8	0,0	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 22-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/10.000 e Eq. 5 m, para o produto ALOS/PRISM

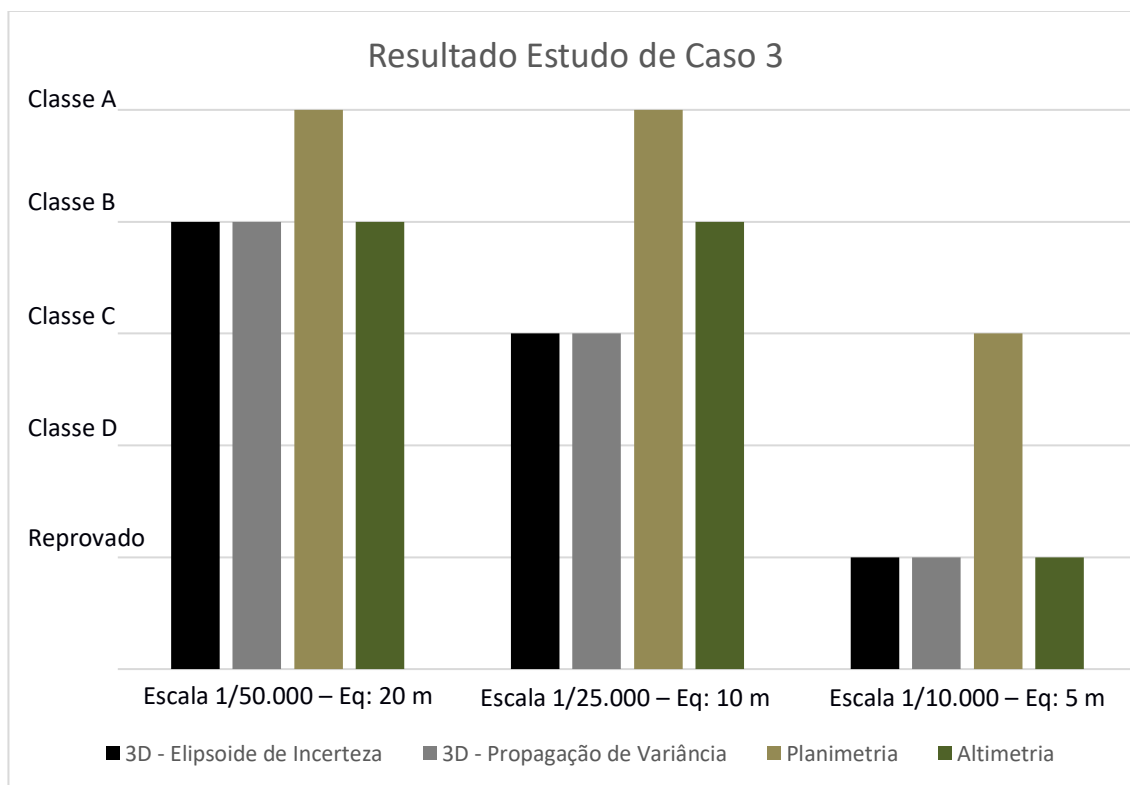
CLASSES	PLANIMETRIA			ALTIMETRIA		
	PEC (%)	EP	RESULTADOS	PEC (%)	EP	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado	83,3	Atende	Reprovado
Classe C	94,4	Atende	Aprovado	72,2	Atende	Reprovado
Classe B	88,9	Atende	Reprovado	72,2	Atende	Reprovado
Classe A	83,3	Atende	Reprovado	38,9	Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

O resultado da classificação do produto para a escala de 1/10.000, Eq: 5 metros, apresentou, segundo a metodologia da ET-CQDG (2016), Classe C para a planimetria e foi reprovado para a altimetria. Segundo as metodologias de Santos (2015) e do Elipsoide de Incertezas, o produto foi reprovado, ou seja, foi rejeitada sua acurácia posicional para a escala testada.

Para uma melhor visualização dos resultados, apresenta-se, na Figura 38, um resumo dos mesmos para este estudo de caso.

Figura 38 - Resumo dos resultados do estudo de caso 3



Fonte: Elaborada pelo autor

O produto testado neste caso é similar ao produto testado no Estudo de Caso 1, ambas imagens são provenientes do sensor ALOS, porém os MDS são de origens diferentes. Foram testadas as mesmas escalas do Estudo de Caso 1, comparando os resultados de ambas, apresentados nas Figuras 32 e Figura 38, percebe-se os resultados são similares, visto que para as escalas de 1/50.000 - Eq: 20 m e 1/10.000 –Eq: 5 m, a classificação da planimetria foi a mesma, em contrapartida a escala de 1/25.000 – Eq: 10 m apresentou uma escala mais restritiva no Estudo de Caso 1 em relação ao Estudo de Caso 3. Isso se dá pelo fato de os processos de ortorretificação das imagens terem sido diferentes, ambos utilizaram as mesmas técnicas para geração da ortoimagem, porém foram utilizados MDT's diferentes, enquanto no Estudo de Caso 1 utilizou-se o SRTM, no Estudo de Caso 3 utilizou-se um MDT híbrido dos pares estereoscópicos do próprio sistema ALOS/PRISM. Como ambos MDT's apresentavam precisões diferentes, conseqüentemente foram gerados ortoimagens com precisões diferentes. Deve-se levar em consideração também que os Estudos de Caso 1 e 3 relatam locais diferentes, o que pode influenciar os resultados.

Comparando também os resultados da classificação do Elipsoide de incertezas com os resultados da classificação de forma tradicional, ET-CQDG (2016),

percebe-se que nestas escalas testadas o EPSI apresentou uma tendência de classificação similar a classificação tradicional da altimetria. Isso se dá pela relação entre as tolerâncias planimétricas e altimétricas, para a escala testada, serem superiores a 2 (tabela 4), com a isso as tolerâncias altimétricas influenciam mais na classificação que as tolerâncias planimétricas, acarretando uma tendência de os resultados do EPSI se aproximarem mais da classificação altimétrica.

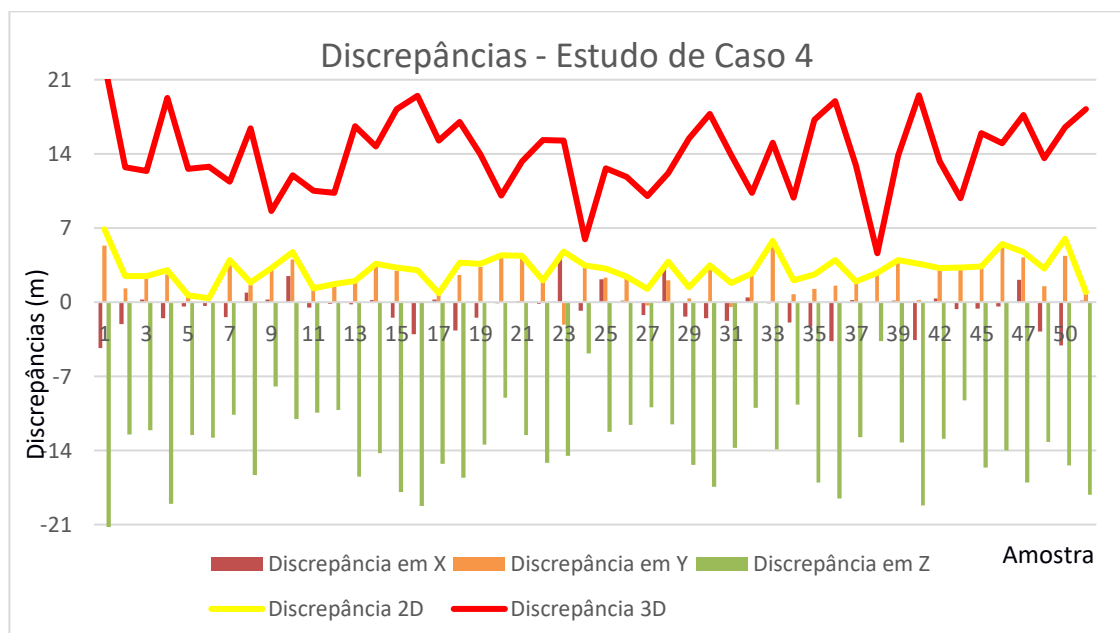
6.5 Resultados e discussões do estudo de caso 4

A partir do experimento prático descrito no estudo de caso 4, foi realizada a classificação do ortofotomosaico gerado pelo *Google Earth*, utilizando a metodologia tradicional (planimetria e altimetria) em comparação com a metodologia proposta.

Dos 50 (cinquenta) pontos de referência utilizados, 2 (dois) pontos de (41 e 43) foram eliminados, por não possuírem uma boa identificação entre seus homólogos.

Primeiramente, foram calculadas as discrepâncias entre os pontos de referência, no mosaico do *Google Earth*, e os seus homólogos na referência. As discrepâncias foram calculadas segundo as Equações 2, 3, 4 e 6. A discrepância tridimensional foi calculada conforme Equação 42. Na Figura 36 estão apresentadas as discrepâncias e suas médias por componente.

Figura 39 - Discrepância dos pontos de checagem utilizados na avaliação do produto tridimensional obtido *Google Earth*



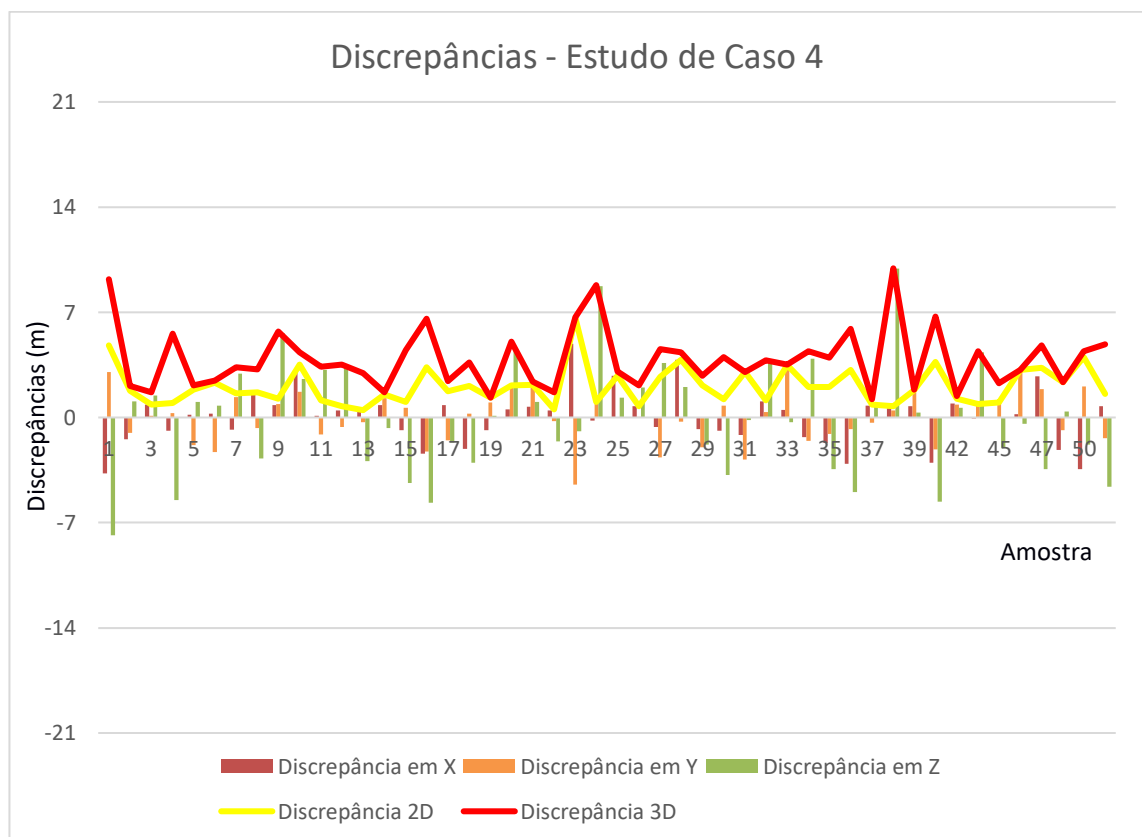
Fonte: Elaborada pelo autor

O produto apresentou média das discrepâncias na direção X de -0,608 metros; discrepância média em Y de 2,325 metros e média das discrepâncias em Z de -13,578 metros. O RMS amostral das discrepâncias em X, Y e Z foram iguais a 1,850 metros, 2,860 metros e 14,062 metros, respectivamente.

Após calculadas as discrepâncias, foi realizado o teste de detecção de *outliers* e tendência. Não foram identificados *outliers*, porém foram identificados efeitos sistemáticos nas componentes X ($t_{tab} = 1,679$; $t_{calc} = 2,385$), Y ($t_{tab} = 1,679$; $t_{calc} = -9,564$) e Z ($t_{tab} = 1,679$; $t_{calc} = 25,443$).

Para sanar tal situação, realizou-se a translação das coordenadas de teste, com módulo igual a média (figura 36) das discrepâncias (X, Y e Z) e sentido oposto, ou seja, foram transladadas as componentes X, Y e Z de 0,608 metros, -2,325 metros e 13,578 metros, respectivamente. A seguir, na Figura 40, são apresentadas as discrepâncias corrigidas dos efeitos sistemáticos.

Figura 40 - Discrepância referenciados pontos de checagem utilizados para avaliação do produto *Google Earth*, corrigidas dos efeitos sistemáticos



Fonte: Elaborada pelo autor

Corrigidos os efeitos sistemáticos, o produto apresentou média na direção X de 0,00 metros; discrepância média em Y de 0,00 metros e discrepância média em Z de 0,00 metros; RMS_X de 1,747 metros RMS_Y de 1,667 metros e RMS_Z de 3,658 metros.

As escalas testadas para este produto não foram as comumente utilizadas. Apesar da média das discrepâncias serem iguais a zero, sua amplitude é muito grande, como é evidenciada no gráfico da figura 40. Como o intuito do presente trabalho é verificar a eficiência da metodologia proposta, desde que todos os testes estejam na mesma escala, não haverá inconsistências.

Com isso o produto foi testado inicialmente para a escala 1/25.000, Eq: 50 metros. Antes de realizar sua classificação, não foi constatada a presença de *outliers*. Passou-se, então, para classificação segundo as metodologias propostas do EPSI (Tabela 32), segundo Santos (2015) com a propagação de variâncias (Tabela 33), e segundo a ET-CQDG (2016) (Tabela 34).

Tabela 23-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/25.000 e Eq. 50 m, para o produto Google Earth

Classes	PEC (%)	EP (RMS)	RESULTADOS
Classe D	100,0	atende	Aprovado
Classe C	100,0	atende	Aprovado
Classe B	100,0	Atende	Aprovado
Classe A	64,6	Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 24-Resultado da classificação, segundo a Propagação de Variâncias para a escala de 1/25.000 e Eq. 50 m, para o produto Google Earth

CLASSES	PEC (%)	EP (%)	RESULTADOS
Classe D	100,0	100,0	Aprovado
Classe C	100,0	100,0	Aprovado
Classe B	100,0	100,0	Aprovado
Classe A	100,0	89,6	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 25-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/25.000 e Eq. 50 m, para o produto Google Earth

CLASSES	PLANIMETRIA			ALTIMETRIA		
	PEC (%)	EP	RESULTADOS	PEC (%)	EP	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe C	100,0	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe B	100,0	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe A	100,0	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados da classificação do produto para a escala de 1/25.000, Eq: 50 metros, apresentou Classe A, tanto para a planimetria quanto para a altimetria, seguindo a metodologia da ET-CQDG (2016), e apresentou Classe B para as metodologias tridimensionais de Santos (2015) e do Elipsoide de Incertezas.

Classificou-se também o produto para a escala de 1/10.000, Eq: 20 metros. Realizou-se o teste de detecção de *outliers*, não sendo identificado nenhum. Em seguida, classificou-se o produto segundo as metodologias propostas do EPSI (Tabela 35), segundo Santos (2015) com a propagação de variâncias (Tabela 36), e segundo a ET-CQDG (2016) (Tabela 37).

Tabela 26-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/10.000 e Eq. 20 m, para o produto Google Earth

Classes	PEC (%)	EP (RMS)	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado
Classe C	100,0	Atende	Aprovado
Classe B	93,8	Atende	Aprovado
Classe A	31,3	Não Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 27-Resultado da classificação, segundo a Propagação de Variâncias para a escala de 1/10.000 e Eq. 20 m, para o produto Google Earth

CLASSES	PEC (%)	EP (%)	RESULTADOS
Classe D	100,0	100,0	Aprovado
Classe C	100,0	100,0	Aprovado
Classe B	95,8	66,7	Reprovado
Classe A	60,4	0,0	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 28-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/10.000 e Eq. 20 m, para o produto Google Earth

CLASSES	PLANIMETRIA			ALTIMETRIA		
	PEC (%)	EP	RESULTADOS	PEC (%)	EP	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe C	100,0	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe B	97,9	Atende	Aprovado	100,0	Atende	Aprovado
Classe A	75,0	Atende	Reprovado	85,4	Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

A classificação segundo a metodologia da ET-CQDG (2016) apresentou Classe B, tanto para a planimetria quanto para a altimetria. A classificação segundo Santos (2015) apresentou Classe C e a classificação segundo a metodologia do Elipsoide de Incertezas apresentou Classe B. Percebe-se, nesta situação, que, apesar da metodologia do Elipsoide de Incertezas ter apresentado a mesma classificação que a metodologia da ET-CQDG (2016), a utilização de metodologias tridimensionais são mais restritivas, visto que a propagação de variância apresentou uma classe mais rigorosa que a tradicionalmente aplicada.

Também se classificou o produto para a escala 1/5.000, Eq: 10 metros. Nesta situação foram identificados dois *outliers* na planimetria (Ponto 1 e Ponto 23) e nenhum na altimetria. Esses pontos foram eliminados e, então, realizou-se a classificação segundo as metodologias propostas do EPSI (Tabela 38), segundo Santos (2015) com a propagação de variâncias (Tabela 39), e segundo a ET-CQDG (2016) (Tabela 40).

Tabela 29-Resultado da classificação, segundo o Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/5.000 e Eq. 10 m, para o produto Google Earth

Classes	PEC (%)	EP (RMS)	RESULTADOS
Classe D	91,3	Não Atende	Reprovado
Classe C	82,6	Não Atende	Reprovado
Classe B	54,3	Não Atende	Reprovado
Classe A	6,5	Não Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 30-Resultado da classificação, segundo a propagação de variâncias para a escala de 1/5.000 e Eq. 10 m, para o produto Google Earth

CLASSES	PEC (%)	EP (%)	RESULTADOS
Classe D	95,6	60,9	Reprovado
Classe C	86,9	0,0	Reprovado
Classe B	60,8	0,0	Reprovado
Classe A	15,2	0,0	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 40-Resultado da classificação, segundo a forma tradicional para a escala de 1/5.000 e Eq. 10 m, para o produto Google Earth

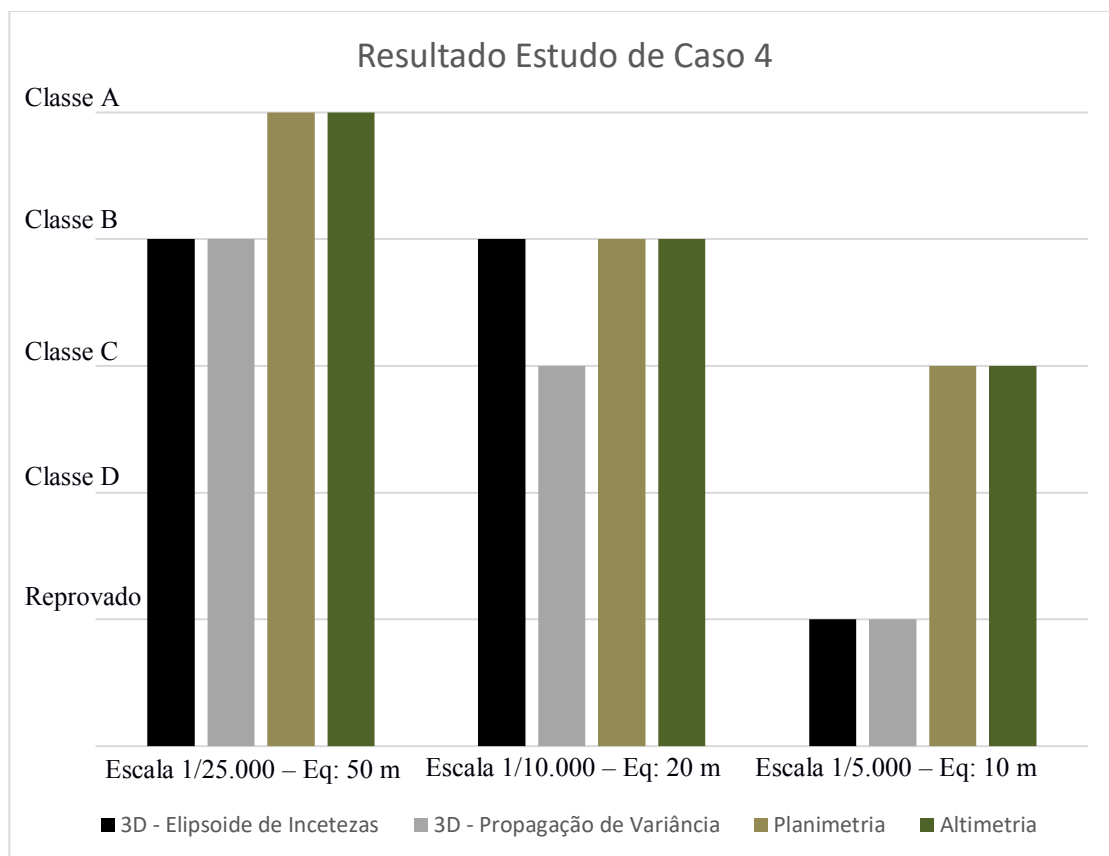
CLASSES	PLANIMETRIA			ALTIMETRIA		
	PEC (%)	EP	RESULTADOS	PEC (%)	EP	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado	95,7	Atende	Aprovado
Classe C	97,8	Atende	Aprovado	95,7	Atende	Aprovado
Classe B	73,9	Atende	Reprovado	95,7	Atende	Reprovado
Classe A	39,1	Atende	Reprovado	50,0	Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados da classificação do produto para a escala 1/5.000, Eq: 10 metros foram Classe C, tanto para a planimetria quanto para altimetria, segundo a metodologia da ET-CQDG (2016). Já as metodologias tridimensionais reprovaram o produto para a escala testada. Mais uma vez, a metodologia tridimensional se mostrou mais restritiva que a usualmente aplicada.

A seguir, na Figura 41, está apresentado um resumo dos resultados do estudo de caso 4.

Figura 41 - Resumo dos resultados do estudo de caso 4

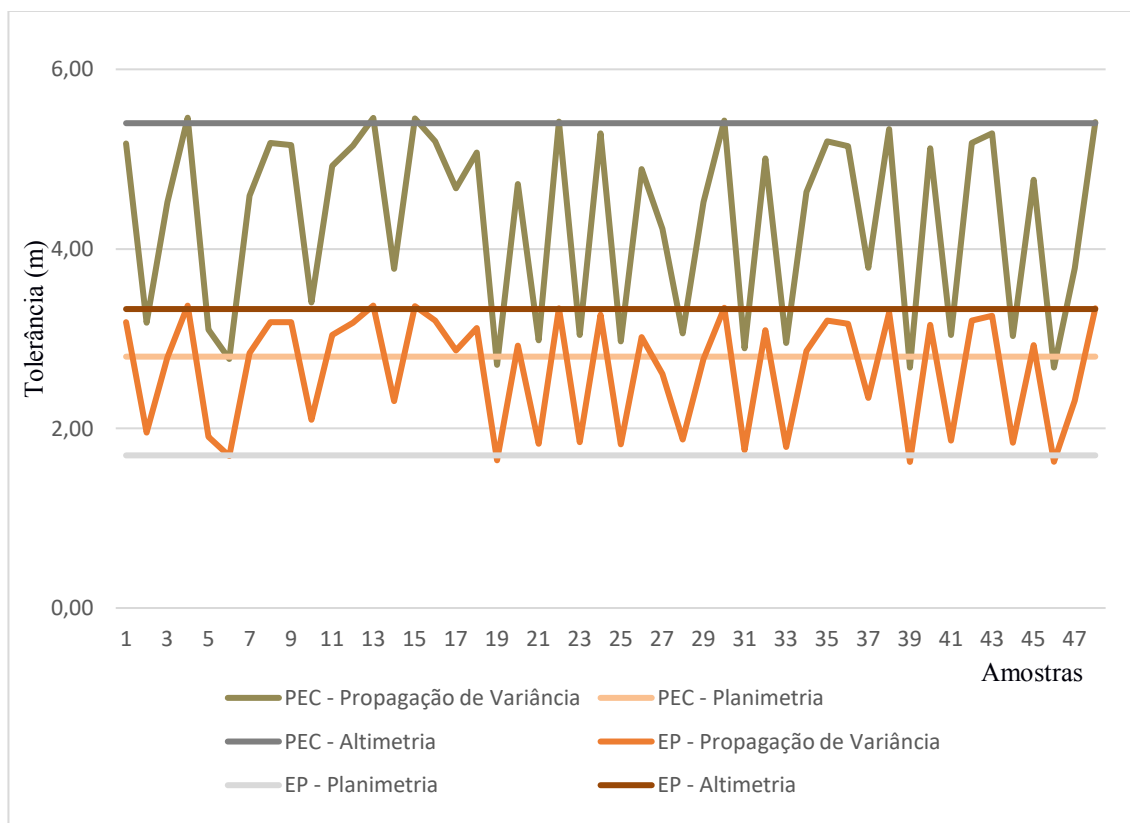


Fonte: Elaborada pelo autor

Analisando os resultados, percebe-se os modelos tridimensionais apresentam ser mais restritivos que a análise separada das componentes planimétricas e altimétricas. Porém em uma escala testada (escala 1/10.000-Eq: 20 m) a classificação do EPSI apresentou a mesma classificação da ET-CQDG (2016). Comparando os resultados das Tabelas 35 e 37 com a Tabela 4, é notável que para a escala 1/10.000 – Eq: 20 m a relação entre a tolerância altimétrica e planimétrica foi de 2/1, ou seja, a tolerância altimétrica é o dobro da tolerância planimétrica, sendo assim a planimetria influencia mais na classificação do EPSI.

Ao comparar os dois modelos tridimensionais, observa-se que as metodologias apresentaram resultados semelhantes da classificação, mas para a escala de 1/10.000-Eq: 20 m, a metodologia da propagação de variância apresentou ser mais restritiva que a do EPSI. A metodologia da propagação apresenta tolerância variável de acordo com as discrepâncias entre os pontos de checagem e a referência. Na figura 42 é apresentado um gráfico que ilustra a variação das tolerâncias (PEC e EP) da metodologia da propagação de variância comparadas as tolerâncias utilizadas na metodologia do EPSI e da ET-CQDG (2016).

Figura 42 - Comportamento das tolerâncias para classe A da Escala 1/10.000-Eq: 20 m.



Fonte: Elaborada pelo autor

Nota-se também que para escala maiores (Ex: 1 / 5.000 - Eq:10 m) a classificação com as metodologias tridimensionais é muito mais restritiva que a usualmente aplicada. Nestes casos a condição do EP é muito rigorosa, ao comparar-se as tabelas 38, 39 e 40, nota-se que para as metodologias tridimensionais, enquanto a condição do PEC é satisfeita em algumas escalas, a condição do EP é rejeitada em todas as classes para a escala testada.

Por fim, utilizou-se a orientação do Elipsoide de Incertezas para verificar se o mesmo apresenta diferenças na classificação. Para isso, fez-se necessário a utilização as MVC's dos pontos de referência coletados em campo.

De forma ao gerar os resultados, utilizou-se as mesmas escalas para se comparar o resultado da classificação, utilizando as mesmas discrepâncias corrigidas dos efeitos sistemáticos. As escalas testadas não são, novamente, as comumente utilizadas. Isto porque o produto apresenta discrepâncias na altimetria não condizente com a equidistância para a referida escala, com isso utilizou-se outra equidistância das curvas de nível, mais coerente com as discrepâncias analisada. Isto não influenciou nos

resultados, visto que o intuito deste trabalho resultados é comparar as metodologias propostas.

Para esta classificação utilizou-se as mesmas escalas de 1/25.000 – Eq: 50 m, 1 / 10.000 – Eq: 20 m e 1 / 10.000 – Eq: 10 m. Nas tabelas 41, 42 e 43 estão apresentados os resultados das classificações utilizando a orientação do Elipsoide de Incertezas para as escalas citadas.

Tabela 31-Resultado da classificação, segundo a orientação do Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/25.000 e Eq. 50 m, para o produto Google Earth

Classes	PEC (%)	EP (RMS)	RESULTADOS
Classe D	100,0	Atende	Aprovado
Classe C	100,0	Atende	Aprovado
Classe B	100,0	Atende	Aprovado
Classe A	93,8	Atende	Aprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

De acordo com o resultado da Tabela 41, o produto apresentou Classe A para referida escala. Comparando a classificação com metodologia do Elipsoide de Incertezas e com a metodologia de Santos (2015), percebe-se que, nesse caso, a orientação foi menos restritiva que os modelos tridimensionais apresentados, visto que, com a orientação do Elipsoide de Incertezas, o produto apresentou Classe A, enquanto os outros dois modelos tridimensionais apresentaram Classe B.

Tabela 32-Resultado da classificação, segundo a orientação do Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/10.000 e Eq. 20 m, para o produto Google Earth

Classes	PEC (%)	EP (RMS)	RESULTADOS
Classe D	97,9	Atende	Aprovado
Classe C	93,8	Atende	Aprovado
Classe B	83,3	Atende	Reprovado
Classe A	41,7	Reprovado	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

O resultado da classificação para a escala 1/10.000 e Eq. 20m, com a orientação do Elipsoide de Incertezas, foi Classe C. Comparando a classificação com a metodologia do Elipsoide de Incertezas e com a metodologia de Santos (2015), percebe-

se que, nesse caso, a orientação foi mais restritiva que a classificação sem a orientação. Nesse caso, a orientação do Elipsoide de Incertezas apresentou a mesma classificação que a metodologia proposta por Santos (2015), sendo que, com o EPSI, o produto apresentou Classe B e, com a metodologia de Santos (2015) e com a metodologia da orientação do Elipsoide de Incertezas, o produto apresentou Classe C.

Por fim, realizou-se a classificação para a escala de 1/5.000 e Eq: 10 metros. A Tabela 43 apresenta a o resultado da classificação.

Tabela 33-Resultado da classificação, segundo a orientação do Elipsoide de Incertezas para a escala de 1/5.000 e Eq. 10 m

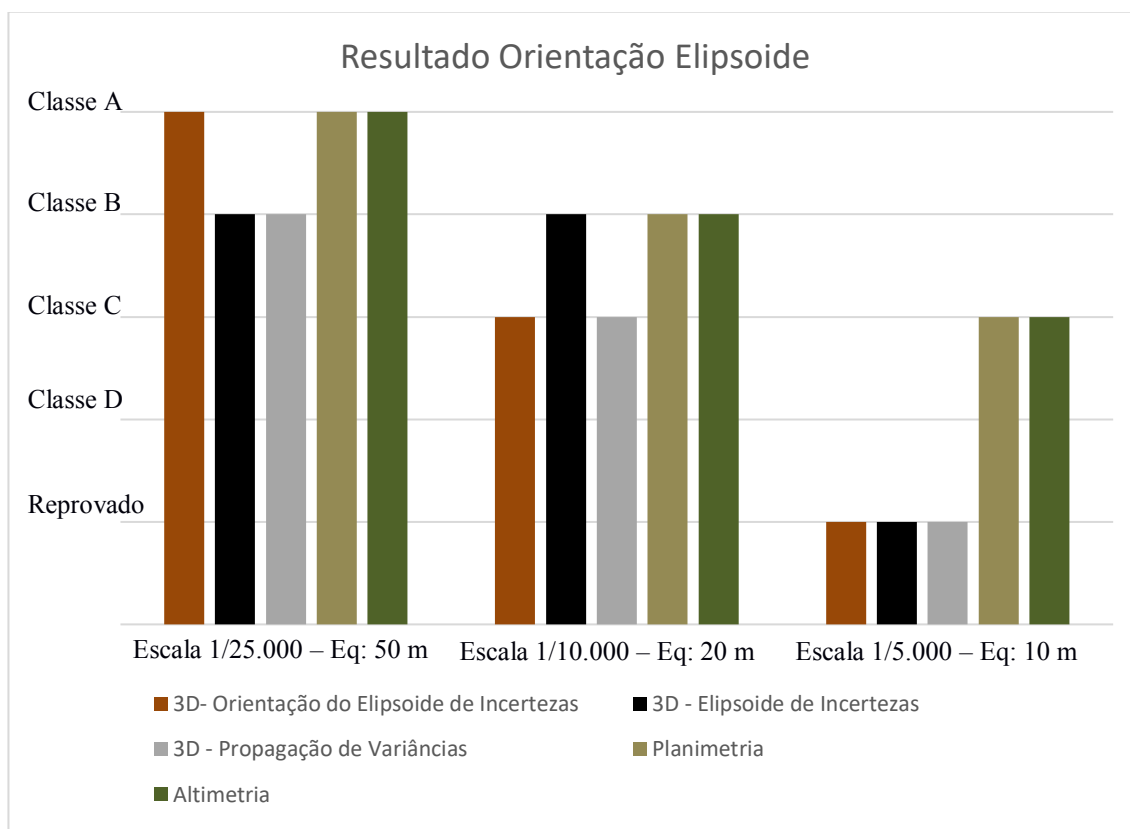
Classes	PEC (%)	EP (RMS)	RESULTADOS
Classe D	85,4	Não Atende	Reprovado
Classe C	64,6	Não Atende	Reprovado
Classe B	37,5	Não Atende	Reprovado
Classe A	18,8	Não Atende	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor

A classificação, segundo Tabela 43, com a orientação do Elipsoide de Incertezas, reprovou o produto para a escala testada. Comparando a classificação com metodologia do Elipsoide de Incertezas e com a metodologia de Santos (2015), percebe-se que todas apresentaram a mesma classificação para este caso.

A Figura 43 apresenta um resumo comparativo entre os resultados das classificações com a metodologia da Orientação do Elipsoide de Incertezas, EPSI, Propagação de Variância e a classificação tradicional.

Figura 43 - Resumo dos resultados do estudo de caso 4, comparando a utilização da orientação do Elipsoide de Incertezas com os modelos tridimensionais



Fonte: Elaborada pelo autor

Observando os resultados ilustrados na Figura 43, nota-se que para escalas menores (Ex: 1/25.000-Eq: 50 m) a classificação com a Orientação do Elipsoide de Incertezas não foi restritiva ao se comparar com as outras metodologias apresentadas. Porém em escalas maiores (Ex: 1/10.000 – Eq: 20 m e 1/5.000 – Eq: 10 m) a classificação com a Orientação do Elipsoide apresentou melhores resultados, sendo, em um caso, mais restritivo que o EPSI e apresentando a mesma classificação da metodologia de Propagação de Variâncias.

Na escala de 1/10.000 – Eq: 20 m, a metodologia da Orientação do elipsoide de Incertezas se mostrou mais restritiva que a do EPSI, apesar de ambas apresentarem praticamente a mesma metodologia. Ao comparar a os resultados das classificações das tabelas 42 e 35, como o RMS nas duas metodologias são iguais, percebe-se que houve um decréscimo na porcentagem de discrepâncias que atendeu a condição do PEC, resultando na classificação mais restritiva do produto.

Porém ao se comparar os resultados da tabela 41 com a tabela 32, percebe-se que não houve um decréscimo da porcentagem de aceitação do PEC, e sim um aumento.

Com isso observa-se que, para o estudo realizado, em escalas menores a Orientação do Elipsoide Incertezas não apresenta ser mais restritivo, não sendo recomendada sua utilização para estas escalas. Porém, para escalas maiores, a Orientação do EPSI se mostrou mais restritiva que a própria classificação com EPSI sem a sua orientação, ao se utilizar escalas maiores.

7. CONCLUSÃO

Ao apresentar uma nova metodologia de avaliação da acurácia posicional de produtos cartográficos tridimensionais utilizando um elipsoide de incertezas, percebe-se importância da necessidade da busca de novos modelos para o controle de qualidade cartográfica.

Com a metodologia do EPSI é possível avaliar as três componentes posicionais (planimetria e altimetria) como um todo, gerando uma classificação de acurácia posicional tridimensional.

Através dos dados simulados pode-se comparar a metodologia proposta com a metodologia de classificação da ET-CQDG (2016). A metodologia do EPSI mostrou-se mais restritiva que a classificação da planimetria em aproximadamente 90% dos casos, em relação a altimetria o EPSI se mostrou mais restritivo em aproximadamente 50% dos casos simulados.

Também pode-se perceber que para escalas maiores o EPSI apresentou classificação similar a classificação da planimetria, já para escalas menores o EPSI demonstrou-se mais influenciado pela altimetria, isso se dá pelo fato de haver uma diferença entre relação entre a tolerância planimetria e altimétrica, onde para escalas menores a relação é de 1 (um) para 1 (um), porém para escalas maiores a relação das tolerâncias é de, aproximadamente, 2 (dois) para 1 (um), ou seja, a tolerância altimétrica é metade da tolerância planimétrica, como as grandezas são inversamente proporcionais a tolerância altimétrica influencia mais no resultado da classificação que a tolerância planimétrica.

Nos estudos de casos foram comparadas as metodologias de classificação do EPSI e Propagação de Variância, proposta por Santos (2015) com a metodologia tradicionalmente aplicada (ET-CQDG (2016)). Ao se comparar as metodologias pode-se perceber que a metodologia do EPSI se mostrou mais restritivo para escalas maiores, enquanto a metodologia da propagação de variância se mostrou mais restritiva para escalas menores.

Ao utilizar a Orientação do Elipsoide de Incertezas, observou-se que para escalas menores, o resultado de sua classificação foi o mesmo da metodologia tradicional, proposta pela ET-CQDG (2016). Porém para escalas maiores seus resultados foram melhores, ou seja, sua classificação foi mais restritiva para grandes escalas, sendo seus resultados similares ao da classificação com a metodologia da propagação de variância.

Recomenda-se a utilização da metodologia de avaliação da acurácia posicional tridimensional com o EPSI, para escalas menores e a metodologia do EPSI com sua orientação espacial para escalas maiores, visto que, além de ser uma metodologia tridimensional, ela apresenta ser mais rigorosa que os métodos usualmente aplicados, sendo indicada para a avaliação da qualidade posicional de produtos cartográficos tridimensionais

Deve salientar que para a utilização da metodologia de classificação com o EPSI as amostras de checagem devem estar livres de outliers e efeitos sistemáticos, visto que estes efeitos sistemáticos influenciam no RMS amostral.

Recomenda-se em trabalhos futuros a simulação de matrizes variância covariância, para testar, em ambiente controlado, o comportamento da classificação em uma dada escala com rotações diferentes. Recomenda-se também a comparação entre a metodologia do EPSI em outros produtos tridimensionais, em diferentes regiões e relevos.

REFERÊNCIAS

ARIZA, F. J. **Calidad Em La Producción Cartográfica**. Madrid, Espanha: Editora Ra-Ma. 2002. 389 pp.

BATISTA, J. MAGUIRE, D. **Modelling The Spatial Structure Of Tropical Forests. Forest Ecology And Management**, Amsterdam V. 110, 1998. 293-314.

BISOGNIN, M. G. **Ajustamento De Linha Poligonal No Elipsoide**. 2006. 157 F. Dissertação (Mestrado Em Geomática) – Universidade Federal De Santa Maria, Santa Maria, 2006.

BRASIL. **Decreto Nº. 243**, de 28 de Fevereiro de 1967. Fixa As Diretrizes e Bases Da Cartografia Brasileira e Dá Outras Providências. Diário Oficial Da União, Brasil, 28 De Novembro De 1967.

BRASIL. **Decreto Nº. 89.817/84**, de 20 de Junho de 1984. Normas Técnicas Da Cartografia Nacional. Brasília, Diário Oficial Da União, Brasil, 22 De Julho 1984.

BRASIL. **Decreto Nº 6.666**, de 27 de Novembro de 2008. Institui, no Âmbito do Poder Executivo Federal, a Infra-Estrutura Nacional de Dados Espaciais - INDE, e dá Outras Providências. Diário Oficial Da União, Brasil, 28 de Novembro de 2008.

BRAVO, J. V. M; SLUTER, C. R. **O Problema Da Qualidade De Dados Espaciais Na Era Das Informações Geográficas Voluntárias**. Boletim De Ciências Geodésicas, V. 21, N. 1, P. 56-79. 2015.

CAMARGO, F. F.; ALMEIDA, C. M.; FLORENZANO, T. G.; OLIVEIRA, C. G. **Acurácia Posicional De MDE ASTER/TERRA em Área Montanhosa**. Revista Geomatica, V. 4, N. 1, P. 12-24, 2009.

CAPRETZ, R. L; BATISTA, J. L. F; SOTOMAYOR, J. F. M; CUNHA, C. R; NICOLETTI, M. F; RODRIGUES, R. R. **Padrão Espacial De Quatro Formações Florestais Do Estado De São Paulo, Através Da Função K De Ripley**, Ciência Florestal, V. 22, N. 3, P. 551-565, 2012.

CARVALHO, A. S.; RODRIGUES, D. D.; COSTA, M. F.; NETO, J. O. A. **Utilização da Regra de Compass ou Método De Bowditch e do MMQ no Ajuste de Poligonal Topográfica**. Revista Agroambiental, V. 3, N. 1, P. 41-51, 2011.

CENTENO, J. A.; MITISHITA, D. A. **Laser Scanner Aerotransportado No Estudo De Áreas Urbanas: a Experiência da UFPR**. XIII Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto. Florianópolis-RS. 2007. P. 3.645-3.652.

CRUZ, C. B. M; BARROS, R. S; CARDOSO, P. V; REIS, R. B; ROSÁRIO, L. S; BARBOSA, S. S; RABACO, L. M. L; LOURENÇO, J. S. Q. **Avaliação Da Exatidão Planialtimétrica dos Modelos Digitais de Superfície (MDS) e do Terreno (MDT) Obtidos Através do Lidar**. Anais XV Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto – SBSR. Curitiba-PR. 2011. P.5463-5470.

DALMOLIN, Q. **Ajustamento Por Mínimos Quadrados**. 2ª Edição. Ed. UFPR. Curitiba, 2004. 180 p.

DEPARTMENT RURAL DEVELOPMENT & LAND REFORM - DRDLR. **Standard For The National Control Survey Network (Reference Frame)**. Republic of South Africa. 2010a.

DEPARTMENT RURAL DEVELOPMENT & LAND REFORM - DRDLR. **Standard For The 1: 10 000 Orthophoto Map Series**. Republic Of South Africa. 2010b.

DEPARTMENT RURAL DEVELOPMENT & LAND REFORM - DRDLR. **Standard For The 1: 50 000 Orthophoto Map Series**. Republic Of South Africa. 2010c.

DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO - DSG. **Especificação Técnica Para A Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV)**. Brasília-DF, 2011.

DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO - DSG. **Norma Da Especificação Técnica Para Controle De Qualidade De Dados Geoespaciais (ET-CQDG)**. Brasília-DF, 2016.

EGG, G. C. **Geração De Modelos Digitais De Superfície Compostos Utilizando Imagens Do Sensor Prism/Alos**. 2012. 177 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal De Viçosa, Viçosa, 2012.

EGG, G. C.; JR GRIPP, J.; MEDEIROS, N. G. **Geração De Modelos Digitais De Superfície Compostos Utilizando Imagens Do Sensor Prism/Alos**. Revista Brasileira De Cartografia, N. 65, V. 5, p. 951-966, Sociedade Brasileira De Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, 2013.

EUROPEAN SPACE AGENCY – ESA. **ALOS Satellite Snaps Europe**. Disponível em: http://www.esa.int/Esacp/Semok69atme_Index_0.Html. (Acesso Em: 11 Jul. 2018.)

FERREIRA, G. F. **Emprego De Simulação No Controle De Qualidade Em Cartografia Aplicado A Modelos Digitais De Superfícies Oriundos De Sensores Orbitais Segundo PEC-PCD**. 2014. 121 F. Dissertação (Mestrado Em Ciências Geodésicas E Tecnologias Da Geoinformação) – Universidade Federal De Pernambuco, Recife, 2014.

FONSECA, I. G. R; MARQUES, E. T; GRIPP JUNIOR, J. **Avaliação Da Acurácia Posicional De Uma Ortoimagem De Barão De Cocais Para Aplicação No Cadastro Territorial Multifinalitário Urbano**. 12º Congresso De Cadastro Técnico Multifinalitario E Gestão Territorial, 10º Encontro De Cadastro Técnico Multifinalitário Para Os Países Do Mercosul, 7º Encontro De Cadastro Técnico Multifinalitário para os Países da América Latina. Anais do COBRAC. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis-SC, 2016.

FONSECA, I. G. R. **Avaliação Da Acurácia Posicional Tridimensional Utilizando Feições Lineares**, 2018, 84 F. Dissertação (Mestrado Em Engenharia Civil) – Universidade Federal De Viçosa, Viçosa, 2018.

GALO, M.; CAMARGO, P. DE O. **O Uso do GPS no Controle de Qualidade de Cartas**. COBRAC - 1994, 1º Congresso Brasileiro De Cadastro Técnico Multifinalitário. Tomo II, P. 41-48, Florianópolis-SC, 1994.

GEMAEL, C. **Introdução Ao Ajustamento De Observações: Aplicações Geodésicas**. 2 Ed. Curitiba-PR: Ed. UFPR. 430 p. 2015.

GETIS, A.; FRANKLIN, J. **Second-Order Neighbourhood Analysis Of Mapped Point Patterns**. Ecology, Oxford, V. 68, P. 473-477. 1987.

GEOSPATIAL INFORMATION AUTHORITY OF JAPAN - GSI. **Excerpt From Regulations For Basic Map Surveys Of Japan**. Japão, 2010.

GOODCHILD; M. F; SHI, W. **Principles Of Modeling Uncertainties In Spatial Data And Spatial Analyses**. 1 Ed. Ed. CRC Press, 432 p. 2010.

GONÇALVES, R. P; SILVA, A. S; ASSIS, L. C; ANDRADE, R. J. O. **Comparação Entre Elipses de Erros Absolutas e Relativas com Mudança na Posição do Datum**. Congresso Brasileiro De Cadastro Técnico Multifinalitário-COBRAC. UFSC, Florianópolis-SC, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA e ESTATÍSTICA - IBGE. **Avaliação Planialtimétrico de Dados ALOS/Prism, Estudo de Caso: Itaguaí-RJ**, Instituto Brasileiro De Geografia e Estatística, Relatório, Rio de Janeiro - RJ. 2009.

INTERGOVERNMENTAL COMMITTEE ON SURVEYING & MAPPING - ICSM. **Australian Map And Spatial Horizontal Data Accuracy Standard**. Australia. 2009.

INSTITUTO GEOGRÁFICO PORTUGUÊS - IGP. **Exactidão e Precisão Posicionais Para a Cartografia nas Escalas 1:1 000, 1:2 000, 1:5 000 e 1:10 000**. Portugal. 2004a.

INSTITUTO GEOGRÁFICO PORTUGUÊS - IGP. **Procedimento para os Trabalhos de Fiscalização da Execução de Ortofotomapas e Cartografia Digital à Escala 1:2.000**. Portugal. 2004b.

INSTITUTO GEOGRÁFICO PORTUGUÊS - IGP. **Procedimento para os Trabalhos de Fiscalização da Execução de Ortofotomapas e Cartografia Digital à Escala 1:10.000**. Portugal. 2004c.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA - INEG. **Modelo de Calidad de Datos Espaciales: Anexo Técnico 2 - Evaluación de la Calidad de Los Datos Espaciales**. Aguascalientes, México. 2009.

IMHOF, E. **Cartographic Relief Presentation**, Esri Press, 2007.

IORIO, M. M.; LASTORIA, G.; MIOTO, C. L.; ALBEREZ, E. A.; PARANHOS FILHO, A. C. **Avaliação de Modelos Digitais de Elevação Extraídos de Imagens Los/Prism e Comparação com os Modelos Disponibilizados Gratuitamente Na Web**. Revista Geociências, V. 31, N. 4, pp. 650-664, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO 19157: Geographic Information – Data Quality**. Switzerland, 2013.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY - JAXA. **Advanced Land Observing Satellite “Daichi” (Alos): Start Of Operations Phase And Data Provision To The Public**. Disponível Em: http://www.Jaxa.Jp/Press/2006/10/20061023_Alos_E.Html. (Acesso Em: 7 Jul. 2018.)

NOGUEIRA JUNIOR; J. B. **Controle De Qualidade De Produtos Cartográficos: Uma Proposta Modelológica**. 2003. 147 p. Dissertação (Mestrado Em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2003.

LA VEJA, P. G.; ARIZA-LÓPEZ, F. J.; MOZAS-CALVACHE, A. T. **Models For Positional Accuracy Assessment Of Linear Features: 2d And 3d Cases**. Taylor & Francis: Survey Review. University Of Jaen, pp. 1-14. 2016.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital Terrain Modeling: Principles And Methodology**. Crc. Press. 340 p. 2005.

LIPSCHUTZ, S.; LIPSON, M. **Linear Algebra**. 4 Ed. New York: Mcgraw-Hill. 432 p. 2009.

LOPES, E. E. **Proposta Modelológica Para Validação De Imagens De Alta Resolução do Google Earth para a Produção De Mapas**. 2009. 112 p. Dissertação (Mestrado Em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. 2009.

MATLAB, R. **2015a V. 8.5.0.197613**, Mathworks Inc. 2015.

MATOS, E. S. **Modelagem Matemática Para A Determinação De Coordenadas Tridimensionais De Pontos Ocultos Em Topografia**. 2017, 131 p. Tese (Doutorado Em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2017.

MERCHANT, D. C. **Spatial Accuracy Standards for Large Scale of Maps**. Proceedings Of The Technical Congress On Surveying And Mapping, V. 1, N. 1, pp. 222-231. 1982.

MONICO, J. F. G; DAL POZ, A. P; GALO, M; SANTOS, M. C; OLIVEIRA, L. C. **Acurácia e Precisão: Revendo os Conceitos de Forma Acurada**. Boletim de Ciências Geodésicas. V. 15, N. 3, pp. 469-483. 2009.

MOZAS, A. T.; ARIZA, F. J. **Detection Of Systematic Displacements In Spatial Database Using Linear Elements**. Cartography And Geographic Information Science, V. 41, N. 4, pp. 309-322. 2014.

NERO, M. A. **Proposta Para O Controle De Qualidade De Bases Cartográficas Com Ênfase Na Componente Posicional**. 2005. 186 p. Tese (Doutorado Em Engenharia De Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP. 2005.

OLIVEIRA, L. F. **Análise De Modelos Digitais De Superfície Gerados A Partir De Imagens Do Sensor Prism/Alos**. 2011. 163 p. Dissertação (Mestrado Em Engenharia Civil) – Universidade Federal De Viçosa, Viçosa-MG. 2011.

OLIVEIRA, M. Z.; VERONEZ, M. R.; TURANI, M.; REINHARDT, A. O. **Imagens Do Google Earth Para Fins De Planejamento Ambiental: Uma Análise De Exatidão Para O Município De São Leopoldo/RS**. XIV Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto – SBSR. Natal-RN. pp. 1.835-1.842. 2009.

OLIVEIRA, T. R.; SANTOS, A. P.; MEDEIROS, N. G.; OLIVEIRA, J. C. **Uso Da Fórmula De Koppe Para A Avaliação Da Acurácia Posicional Em MDS**. In: Meireles, T. A. V.; Silva, C. R. Da; Santil, F. L. De P. (Orgs.). *Geotecnologias Aplicadas Ao Mapeamento [Recurso Eletrônico]*. Monte Carmelo: PGE. Pp. 66-85. 2017.

PEREIRA, T. A J; NERO, M. A. **Análise De Normas De Controle De Qualidade Posicional Em Cartografia Ao Redor Do Mundo: Exemplos Atuais De Alguns Países**. IV Simpósio Brasileiro De Ciências Geodésicas E Tecnologias Da Geoinformação. Recife-PE. pp. 01-09. 2012.

R. R Documentation, Disponível Em:
<https://www.Rdocumentation.Org/Packages/Compositions/Versions/1.40-2/Topics/Rnorm> (Acesso Em: 29 Out. 2018.)

RIPLEY, B. D. **Modelling Spatial Patterns** (With Discussion). Journal Of The Royal Statistical Society, Series B, London, V. 39, N. 2, pp. 172-212, 1977.

RODRIGUES, D. D. **Técnicas Topográficas para Posicionamento Planimétrico, com Estimativa da Precisão - Posicionamento Planimétrico de Pontos Isolados**. Notas De Aula CIV-313, Topografia IV, Universidade Federal De Viçosa-UFV, Viçosa- MG. 2007.

SANTOS, A. J. P. M. **Proposta de Ajustamento para Melhoria da Confiabilidade e Precisão dos Pontos de Redes Geodésicas para Fins Topográficos Locais**. 2006. 183 p. Dissertação (Mestrado Em Engenharia Civil) – Universidade De São Paulo, São Carlos, 2006.

SANTOS, A. P. **Avaliação Da Acurácia Posicional Em Dados Espaciais Com O Uso Da Estatística Espacial**. 2010. 110 p. Dissertação (Mestrado Em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2010.

SANTOS, A. P. **Controle de Qualidade Cartográfica: Metodologia Para Avaliação da Acurácia Posicional em Dados Espaciais**. 2015. 172 p. Tese (Doutorado Em Engenharia Civil) – Universidade Federal De Viçosa, Viçosa-MG, 2015.

SANTOS, A. P. MEDEIROS, N. G.; SANTOS, G. R.; RODRIGUES, D. D. **Avaliação da Acurácia Posicional Planimétrica em Modelos Digitais de Superfície com o Uso De Feições Lineares**. Boletim De Ciências Geodésicas, Curitiba-PR, V. 22, N. 1, pp. 157-174. 2016.

SCHMITT, A.; ROSENFELDT, Y. A. Z.; OLIVEIRA, M. O.; ROSOLEM, G. P. N.; LOCH, C. **Proposta De Mobilidade Coletiva Para A Região Metropolitana De**

Florianópolis Pensada A Partir De Imagens Do Satélite Geoeye E Banco De Dados De Software SIG. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu – PR. pp. 810-817. 2013.

SHI, W; LIU, W. **A Stochastic Process-Based Model For The Positional Error Of Line Segments In Gis.** Int. J. Geographical Information Science, Vol. 14, No. 1, pp. 51-66, 2000.

SILVA, L. A.; NAZARENO, N. R. X. **Análise do Padrão de Exatidão Cartográfica da Imagem do Google Earth Tendo Como Área de Estudo A Imagem da Cidade De Goiânia.** XIV Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto – SBSR. Natal-CE, pp. 1723-1730, 2009.

SOARES, M. C.; RUARO, T. A.; AGUIAR, C. R. **Controle De Qualidade Da Base Cartográfica Da Cidade De Pato Branco No Software Google Earth.** Synergismus Scientifica UFPR, I Semana Acadêmica De Agrimensura, Pato Branco-PR. 2010.

STANDARDIZATION AGREEMENT – STANAG. **STANAG N°. 2215, Standardization Agreement. Evaluation Of Land Maps, Aeronautical Charts And Digital Topographic Data.** NATO Standardization Agency – NSA. North Atlantic Treaty Organization (Nato). 7 Ed. Bruxelas, 2010.

TONG, X; SUN, T; FAN, J; GOODCHILD, M, F; SHI, W. **A Statistical Simulation Model For Positional Error Of Line Features In Geographic Information Systems (Gis).** International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation, N 21, pp. 136-148. 2013.

TOMMASELLI, A. M. G.; MONICO, J. F. G.; CAMARGO, P. O. **Análise Da Exatidão Cartográfica Da Carta Imagem São Paulo.** 5º Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto-SBSR, Natal-RN. V. 1, P. 253-257, 1988.

TORMAN, V. B. L; COSTER, R; RIBOLDI, J. **Normalidade De Variáveis: Métodos De Verificação E Comparação De Alguns Testes Não-Paramétricos Por Simulação.** Revista HCPO-Hospital Das Clinicas De Porto Alegre, V. 32, N. 2, pp. 227-234, 2012.

UNITED STATE GEOLOGICAL SERVICE - USGS. **Shuttle Radar Topography Mission (Srtm).** Disponível Em: <https://Lta.Cr.Usgs.Gov/Srtm>. (Acesso Em: 30 Out. 2018.)

WEIDNER, U.; FÖRSTNER, W. **Towards Automatic Building Extraction From High-Resolution Digital Elevation Models.** ISPRS Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing, V. 50, N. 4, pp. 38-49, 1995.

WONG, K. W. **Mathematical Formulation And Digital Analysis In Close-Range Photogrammetry.** XIII Congress Of The International Society For Photogrammetry. Helsinki, Finland, 1976.

WONG, D.W.S., AND LEE, J. **Statistical Analysis Of Geographic Information With Arcview Gis And Arcgis.** John Wiley & Sons. 2005.

ZANARDI, R. P. Geração De Modelo Digital De Terreno A Partir De Par Estereoscópico Do Sensor CCD Do Satélite Cbers-2 E Controle De Qualidade Das Informações Altimétricas. 2006. 94 p. Dissertação (Mestrado Em Sensoriamento Remoto) –Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre-RS, 2006.

APÊNDICE A

A1 - Matriz variância e covariância dos pontos de referência do estudo de caso 4

P1	0,01 -0,8223 -0,7081	-0,8223 0,017 0,7021	-0,7081 0,7021 0,019	P17	0,022 -0,6426 -0,2904	-0,6426 0,023 -0,0495	-0,2904 -0,0495 0,017	P39	0,01 -0,8223 -0,7081	-0,8223 0,017 0,7021	-0,7081 0,7021 0,019
P2	0,018 -0,6365 -0,7305	-0,6365 0,018 0,4152	-0,7305 0,4152 0,025	P18	0,025 -0,6365 -0,7305	-0,6365 0,018 0,4152	-0,7305 0,4152 0,025	P40	1,865 -0,9483 -0,9847	-0,9483 2,658 0,9566	-0,9847 0,9566 1,125
P3	0,018 -0,7702 -0,7042	-0,7702 0,011 0,7799	-0,7042 0,7799 0,015	P19	0,545 -0,5519 -0,5298	-0,5519 0,39 0,2984	-0,5298 0,2984 0,418	P42	0,026 -0,6826 -0,345	-0,6826 0,023 0,271	-0,345 0,271 0,007
P4	0,059 -0,7913 -0,2604	-0,7913 0,062 0,0495	-0,2604 0,0495 0,043	P20	0,181 -0,9291 -0,8655	-0,9291 0,226 0,9034	-0,8655 0,9034 0,121	P44	0,076 -0,7913 -0,2604	-0,7913 0,077 0,0495	-0,2604 0,0495 0,043
P5	0,012 -0,8368 -0,6195	-0,8368 0,016 0,7567	-0,6195 0,7567 0,007	P21	0,011 -0,6128 -0,345	-0,6128 0,012 0,271	-0,345 0,271 0,007	P45	0,181 -0,9291 -0,8655	-0,9291 0,251 0,5033	-0,8655 0,5033 0,144
P6	0,016 -0,664 -0,5709	-0,664 0,015 0,3577	-0,5709 0,3577 0,011	P22	0,012 -0,8367 -0,6195	-0,8367 0,016 0,7567	-0,6195 0,7567 0,007	P46	0,011 -0,6128 -0,345	-0,6128 0,012 0,271	-0,345 0,271 0,007
P7	0,017 -0,802 -0,6165	-0,802 0,019 0,5747	-0,6165 0,5747 0,01	P23	0,026 -0,6826 -0,3004	-0,6826 0,023 -0,0595	-0,3004 -0,0595 0,022	P47	0,019 -0,7702 -0,7042	-0,7702 0,023 0,7799	-0,7042 0,7799 0,028
P8	0,012 -0,8368 -0,6195	-0,8368 0,016 0,7567	-0,6195 0,7567 0,007	P24	0,024 -0,7443 -0,3006	-0,7443 0,026 0,5184	-0,3006 0,5184 0,018	P48	0,028 -0,851 -0,7116	-0,851 0,032 0,6641	-0,7116 0,6641 0,029
P9	1,866 -0,9843 -0,9647	-0,9843 2,658 0,9566	-0,9647 0,9566 1,136	P25	0,085 -0,791 -0,6355	-0,791 0,094 0,5425	-0,6355 0,5425 0,045	P39	0,075 -0,5835 -0,4531	-0,5835 0,054 0,2976	-0,4531 0,2976 0,039
P10	0,012 -0,6128 -0,348	-0,6128 0,011 0,2716	-0,348 0,2716 0,007	P26	0,019 -0,7276 -0,6737	-0,7276 0,015 0,4591	-0,6737 0,4591 0,015	P40	0,021 -0,7139 -0,4936	-0,7139 0,019 0,4446	-0,4936 0,4446 0,011
P11	0,022 -0,8304 -0,7076	-0,8304 0,026 0,6593	-0,7076 0,6593 0,01	P27	0,032 -0,8004 -0,7576	-0,8004 0,03 0,6093	-0,7576 0,6093 0,035	P42	0,014 -0,6114 -0,6206	-0,6114 0,012 0,7044	-0,6206 0,7044 0,012

P12	$\begin{vmatrix} 0,015 & -0,6554 & -0,6744 \\ -0,6554 & 0,01 & 0,5449 \\ -0,6744 & 0,5449 & 0,008 \end{vmatrix}$	P28	$\begin{vmatrix} 0,014 & -0,6114 & -0,6206 \\ -0,6114 & 0,012 & 0,7044 \\ -0,6206 & 0,7044 & 0,012 \end{vmatrix}$	P46	$\begin{vmatrix} 0,021 & -0,851 & -0,7116 \\ -0,851 & 0,02 & 0,6641 \\ -0,7116 & 0,6641 & 0,009 \end{vmatrix}$
P13	$\begin{vmatrix} 0,016 & -0,7401 & -0,4204 \\ -0,7401 & 0,009 & 0,3531 \\ -0,4204 & 0,3531 & 0,005 \end{vmatrix}$	P29	$\begin{vmatrix} 0,022 & -0,832 & -0,7039 \\ -0,832 & 0,025 & 0,6844 \\ -0,7039 & 0,6844 & 0,014 \end{vmatrix}$	P47	$\begin{vmatrix} 0,021 & -0,7023 & -0,466 \\ -0,7023 & 0,016 & 0,4252 \\ -0,466 & 0,4252 & 0,014 \end{vmatrix}$
P14	$\begin{vmatrix} 0,021 & -0,851 & -0,7116 \\ -0,851 & 0,02 & 0,6641 \\ -0,7116 & 0,6641 & 0,009 \end{vmatrix}$	P30	$\begin{vmatrix} 0,121 & -0,6021 & -0,53 \\ -0,6021 & 0,086 & 0,1319 \\ -0,53 & 0,1319 & 0,051 \end{vmatrix}$	P49	$\begin{vmatrix} 0,019 & -0,7623 & -0,8022 \\ -0,7623 & 0,016 & 0,6664 \\ -0,8022 & 0,6664 & 0,026 \end{vmatrix}$
P15	$\begin{vmatrix} 0,022 & -0,7864 & -0,651 \\ -0,7864 & 0,02 & 0,5033 \\ -0,651 & 0,5033 & 0,014 \end{vmatrix}$	P31	$\begin{vmatrix} 0,113 & -0,2968 & -0,4909 \\ -0,2968 & 0,161 & 0,5808 \\ -0,4909 & 0,5808 & 0,077 \end{vmatrix}$	P50	$\begin{vmatrix} 0,019 & -0,8223 & -0,7081 \\ -0,8223 & 0,017 & 0,7021 \\ -0,7081 & 0,7021 & 0,01 \end{vmatrix}$
P16	$\begin{vmatrix} 0,062 & -0,7913 & -0,2604 \\ -0,7913 & 0,068 & 0,0495 \\ -0,2604 & 0,0495 & 0,043 \end{vmatrix}$	P38	$\begin{vmatrix} 0,015 & -0,7702 & -0,7042 \\ -0,7702 & 0,018 & 0,7799 \\ -0,7042 & 0,7799 & 0,011 \end{vmatrix}$	P51	$\begin{vmatrix} 0,02 & -0,8189 & -0,8574 \\ -0,8189 & 0,02 & 0,8173 \\ -0,8574 & 0,8173 & 0,021 \end{vmatrix}$