



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 10, nº 2 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n2ID36353>



Avaliação da qualidade posicional da nuvem de pontos obtida a partir de Laser Scanner Terrestre (LST)

Evaluation of positional quality of point clouds obtained by Terrestrial Laser Scanner (TLS)

Rodrigo Pinto da Silva¹; Dalto Domingos Rodrigues²; Afonso de Paula Santos³; Marcelo Antonio Nero⁴; Marcos Vinicius Sanches Abreu⁵

¹ Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / Informações Espaciais, Viçosa/MG, Brasil. Email: rodrigopintodasilva80@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2501-8341>

² Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / Informações Espaciais, Viçosa/MG, Brasil. Email: dalto@ufv.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0325-8926>

³ Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / Informações Espaciais, Viçosa/MG, Brasil. Email: afonso.santos@ufv.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7248-4524>

⁴ Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Departamento de Cartografia, Belo Horizonte/MG, Brasil. Email: marcelo-nero@ufmg.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2124-5018>

⁵ Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / Informações Espaciais, Viçosa/MG, Brasil. Email: marcos.abreu@ufv.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8978-3248>

Resumo: O levantamento 3D via LST (Laser Scanner Terrestre) fornece rapidamente milhares de pontos da área mapeada e reduz os custos operacionais em termos de levantamento. Várias empresas usam a nuvem de pontos LST como referência para outros levantamentos, embora a acurácia posicional deste produto não tenha sido avaliada como totalmente confiável. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a qualidade posicional da nuvem de pontos gerada pelo LST de acordo com o Decreto nº 89.817 (Brasil, 1984), aliado ao ET-CQDG (CONCAR, 2011; DCT/DSG, 2016). Para tanto, foram utilizados pontos de controle coletados com receptores GNSS pelo método de levantamento RTK para a avaliação. O número de pontos de controle foi definido pelo método do lote isolado com procedimento de amostragem de acordo com o DCT/DSG (2016). Para avaliar a distribuição espacial dos pontos, utilizou-se a Função *K de Ripley*. Para análise de tendência, foi empregada a Média Direcional dos vetores de discrepância, juntamente com a Variância Circular. Os resultados mostram que a nuvem de pontos LST é compatível em termos de acurácia e precisão planimétricas à escala de 1:280 para áreas planas, sendo classificada como classe A (PEC-PCD, Padrão de Exatidão Cartográfica-Padrão Cartográfico Digital) para planimetria, de acordo com o padrão brasileiro de precisão posicional, não apresentando tendências nas coordenadas.

Palavras-chave: Controle de Qualidade; amostragem; Precisão Posicional; Cartografia; TLS; ET-CQDG.

Abstract: 3D TLS (Terrestrial Laser Scanner) surveys rapidly provide thousands of points of the mapped area and reduces the surveying operational costs. Several companies use TLS point clouds as a reference for other surveys, although the positional accuracy of this product has not been evaluated as fully reliable. This study aimed to evaluate the positional quality of point clouds generated by Terrestrial Laser Scanner (TLS) according to Decree No. 89.817 (Brazil, 1984), in addition to ET-CQDG (CONCAR, 2011; DCT/DSG, 2016). For this purpose, control points collected with GNSS receivers by RTK surveying were used for the evaluation. The number of control points was defined by the isolated lot method with sampling procedure, according to DCT/DSG (2016). To evaluate the spatial distribution of points, the Ripley K-Function was used. For trend analysis, the directional mean of the discrepancy vectors, together with circular variance was used. The results for this study show that TLS points cloud is compatible by considering the planimetric precision and planimetric accuracy to the scale of 1: 280 for flat areas, being classified as class A (CAS-DCS, Cartographic Accuracy Standard-Digital Cartographic Standard) for planimetry, according to Brazilian standards of positional accuracy, showing no trends in the coordinates.

Keywords: Quality Control; sampling; Positional Accuracy; Cartography; TLS; ET-CQDG.

Recebido: 20/05/2024; Aceito: 13/08/2024; Publicado: 26/09/2024.

1. Introdução

Recentemente, os sistemas Laser Scanner Terrestre (LST), Laser Scanner Móvel (LSM) e Laser Scanner Aéreo (LSA), por considerarem uma aquisição geral de dados com sensores laser, têm tido melhorias constantes, com melhor resolução, tanto em termos de sensores terrestres (WUTKE e CENTENO, 2007; MARTINS NETO *et al.*, 2013; TAN *et al.*, 2024), e sensores aéreos apresentados em Vosselman e Dijkman (2001), Rottensteiner e Briese (2002), Botelho e Centeno (2007), Fonseca Neto *et al.* (2017). Isso leva a uma tendência positiva para aplicações que requerem modelos digitais de terreno (MDT) e modelos digitais de superfície (MDS) com alta precisão (PIROTTI *et al.*, 2012).

Na área de geociências, o LST, LSM e LSA têm sido utilizados em diversas aplicações de engenharia (STAIGER, 2003) como modelagem digital de terreno (MDT), devido à rápida taxa de aquisição de dados e confiabilidade das informações altimétricas fornecidas pelo equipamento (PIROTTI *et al.*, 2012); mapeamento topográfico e cartográfico para fins cadastrais (VOSELMAN e DIJKMAN, 2001; BOTELHO e CENTENO, 2011); pré-projetos de rodovias e ferrovias; verificação de interferências (ROTTENSTEINER e BRIESE, 2002); extração de objetos (CENTENO e PEIXOTO, 2023); detecção de alterações em função das eras glaciais relevantes na elevação da superfície (VOORDENDAG *et al.*, 2023); monumentos históricos para preservação e reconstrução do patrimônio cultural; sítios arqueológicos para estudo/pesquisa arqueológica; grandes estruturas como aeronaves e embarcações para avaliação da qualidade de fabricação das peças antes da montagem; pontes; monitoramento de estruturas para avaliação de desgaste (LENARTOVICZ, 2013); na área de expansão industrial para monitoramento de interferências na montagem de novos equipamentos e de levantamento de como "As Built" (VOSELMAN e DIJKMAN, 2001; STAIGER, 2003; NASCIMENTO JÚNIOR *et al.*, 2006; WUTKE e CENTENO, 2007; BOTELHO e CENTENO, 2011);

Segundo Santos *et al.* (2016a), para definir a finalidade a que um produto será destinado é necessário avaliar a qualidade posicional dos dados espaciais, uma vez que o mapeamento cartográfico produz modelos da realidade, que posteriormente serão utilizados para a tomada de decisões. Assim, quanto maior for o nível de controle dos dados espaciais, maior será o nível de precisão para a tomada de decisão.

O objetivo principal deste estudo é analisar a qualidade planialtimétrica posicional de nuvens de pontos geradas por LST, utilizando o método de análise de características lineares e de pontos.

Este trabalho se justifica pelo fato de que muitos usuários utilizam o LST para gerar dados espaciais, mas carecem de um conhecimento aprofundado sobre a qualidade posicional dos produtos resultantes (NASCIMENTO JÚNIOR *et al.*, 2006; WUTKE and CENTENO, 2007; PIROTTI *et al.*, 2012; LENARTOVICZ, 2013; MARTINS NETO *et al.*, 2013).

Também é importante apontar outros trabalhos e pesquisas que comentam e relatam o estado da arte e as possibilidades em termos de aplicações, bem como a precisão resultante do uso do LST, como em Staiger (2003), Nascimento Júnior *et al.* (2006), Wutke e Centeno (2007), Martins Neto *et al.* (2013), Cintra e Gonçalves (2017), Alves *et al.* (2020), Elaksher *et al.* (2023), TAN *et al.*, 2024).

Para avaliar as nuvens de pontos do LST, deve-se fazer o uso da PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) definido no Decreto nº 89.817 de 1984 (Brasil, 1984), que regulamenta a classificação de produtos cartográficos no Brasil, bem como as atualizações dos conceitos estabelecido em (CONCAR, 2011; DCT/DSG, 2016), que define o PEC-DCS (Padrão de Exatidão Cartográfica- Padrão Cartográfico Digital).

2. Metodologia

Para a condução prática desta pesquisa foram utilizados os seguintes recursos: laser scanner terrestre, modelo VZ 400, fabricante RIEGL. As principais características do scanner são: taxa de medição de 42.000 pts/seg para frequência de 100 KHz e taxa de medição de 122.000 pts/seg para frequência de 300 KHz; distância máxima de 600 m para alvo natural com refletividade de 90% e frequência de 100 kHz, e distância mínima de 1,5 m; precisão de 3 mm e acurácia de 5 mm; divergência do laser 0,35 mrad, leitura 360° na horizontal e na 100° (+ 60°/ - 40°) na vertical; um par de receptores GNSS - RTK, fabricante Javad, modelo Triumph-1, utilizados para levantamento preciso das posições do laser scanner, com as seguintes especificações técnicas: precisão horizontal de 1,0 cm + 1,0 ppm, precisão vertical de 1,5 cm + 1,0 ppm, para o modo de levantamento cinemático RTK (Real Time Kinematic). Para o modo de levantamento pós-processado, a precisão horizontal é de 3 mm + 0,5 ppm e a precisão vertical é de 5 mm + 0,5 ppm. Os softwares utilizados para processamento dos dados coletados foram: para processamento de dados do laser scanner, foi utilizado o software RiscanPro, versão 2.6.1; para realizar a análise estatística, foi utilizado o programa GeoPEC, versão 3.6 (SANTOS, 2023); para implementar o método de feições lineares, foi utilizado o Software ArcGIS Desktop versão 10.5. O laser scanner foi adaptado ao veículo por meio de uma base anti-choque (fabricada pela Riegl), que possui um sistema amortecedor, reduzindo assim o impacto

no equipamento proveniente da movimentação do veículo para varredura da área de estudo. O laser scanner foi controlado via WIFI através de um tablet. Para realizar o processamento dos dados utilizou um computador Dell Inspiron 15, com processador Intel® Core™ i7-6500U, CPU @2,50GHz, memória RAM de 16 GB, placa de vídeo dedicada GeForce 930M 4 GB, sistema operacional de 64 bits.

A metodologia (figura 2) pode ser dividida nas seguintes fases: (1) definição da área de estudo; (2) levantamentos de campo com LST e processamento de dados; e (3) validação da nuvem de pontos gerada pelo LST.

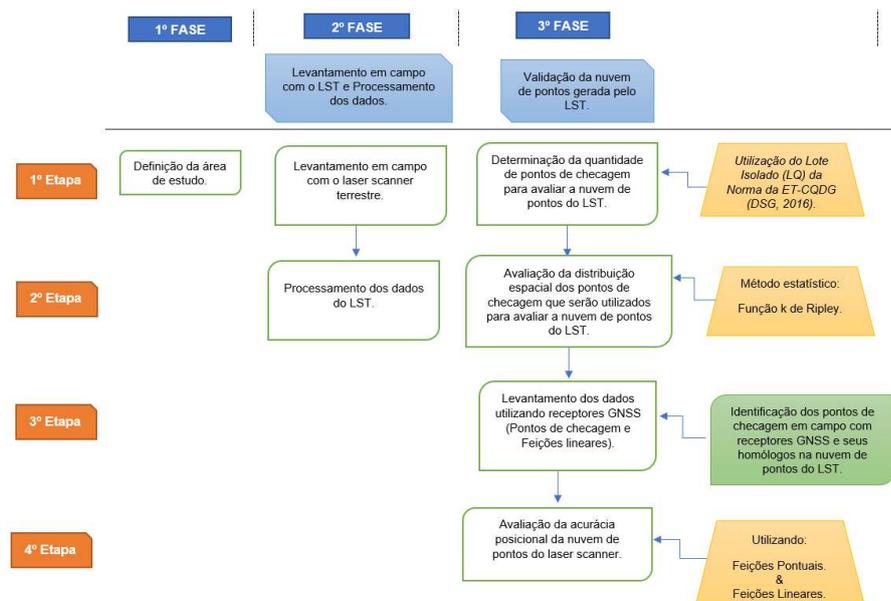


Figura 1 – Visão geral de todas as fases da metodologia.

Fonte: Autores (2024).

2.1 Fase 1: Definição da área de estudo

A primeira etapa da Fase 1 iniciou-se com a escolha da área levantada. Para este estudo, determinamos uma área (Figura 3) dentro do Campus da Universidade Federal de Viçosa, localizada na Zona da Mata de Minas Gerais, com coordenadas geográficas 20°45'14" S e 42°52'54" W no Sistema de Referência WGS-84 (*World Geodetic System 84*). O tamanho da área de estudo foi de aproximadamente 11,8 ha (hectares).

2.2 Fase 2: Levantamentos de campo com LST e processamento de dados

Na primeira etapa da Fase 2 foi realizado o levantamento da área de estudo utilizando um LST da RIEGL, modelo VZ 400, acoplado a um veículo por meio de uma base anti-choque fabricada pela RIEGL, onde a densidade média de nuvens de pontos foi de aproximadamente de 4.000 /m² (quatro mil por metros quadrados). Foram realizadas cinquenta e cinco (55) posições com o LST.

A segunda etapa da Fase 2 começou com o processamento dos dados do levantados com o LST. Foi utilizado o software RiscanPro, versão 2.6.1. Após o processamento, o resultado correspondeu a uma nuvem de pontos que terá sua acurácia posicional avaliada nas etapas seguintes.

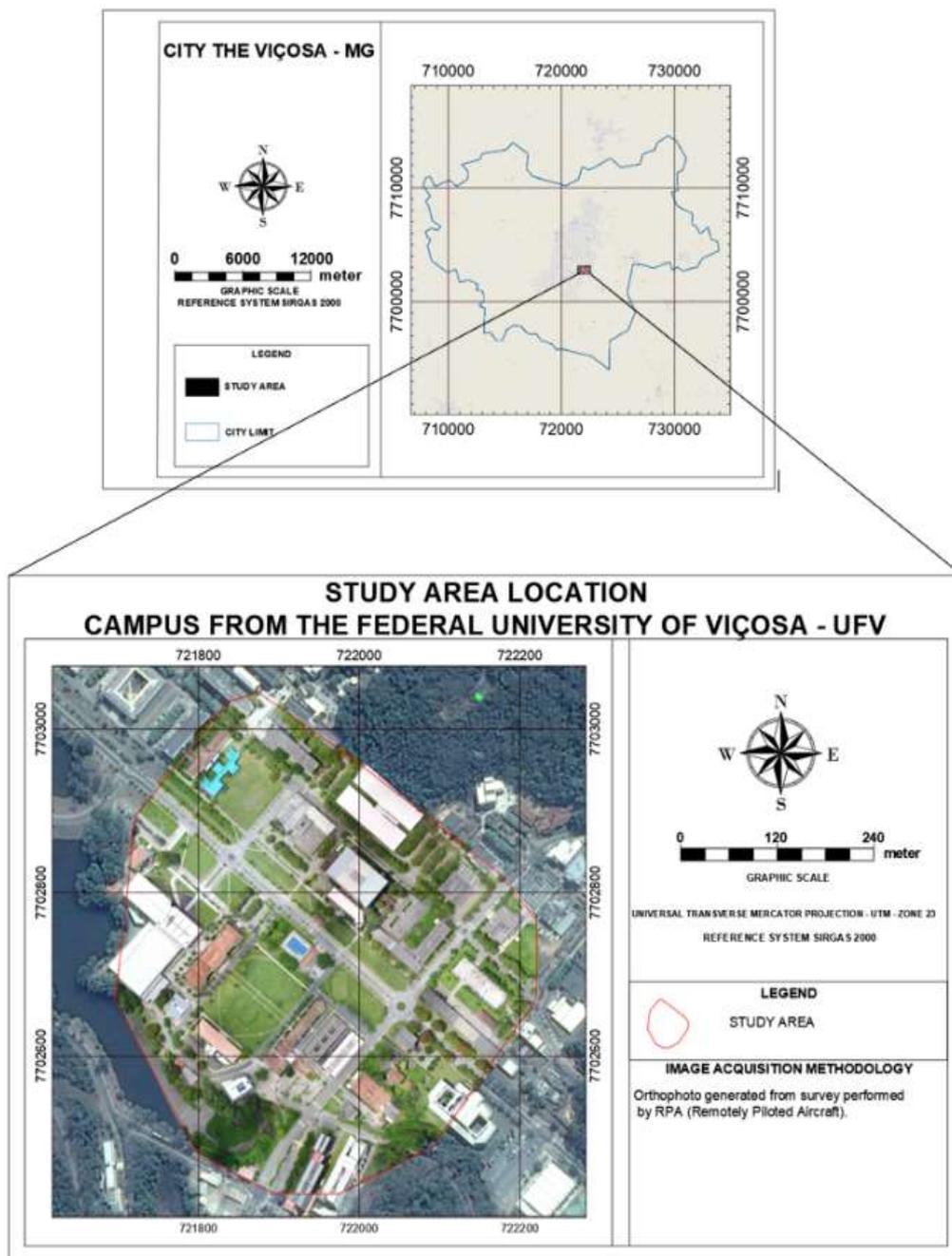


Figura 2 – Área de estudo, Campus UFV – Universidade Federal de Viçosa.
Fonte: Autores (2024).

2.3 Fase 3: Validação da nuvem de pontos gerada com o Laser Scanner Terrestre (LST)

Uma das técnicas utilizadas para avaliar a acurácia posicional de um produto cartográfico é a utilização do método de feições pontuais (ARIZA-LÓPEZ, 2002; NERO, 2005; CINTRA e NERO, 2005; ARIZA-LÓPEZ et al., 2007; ARIZA-LÓPEZ e ATKINSON-GORDO, 2008, NERO et al., 2017).

Nesse método, a avaliação da acurácia posicional das feições pontuais é realizada comparando as amostras de pontos de checagem, obtidas em campo ou em algum dado espacial mais acurado, com a amostra de pontos homólogos no dado espacial a serem avaliados. A partir dos resultados gerados dessa comparação, diversas formulações e testes estatísticos são aplicados de acordo com a norma de acurácia posicional utilizada.

Os valores de discrepância planimétrica ($disc_{2D}$) e altimétrica ($disc_z$), descritos nas Equações 1 e 2, são obtidos pelos vetores da resultante posicional entre as coordenadas de referência (X_{ref}, Y_{ref}) obtidas em campo, com as coordenadas de teste obtidas dos dados espaciais (X_{test}, Y_{test}). O modelo matemático para cálculo do RMSE das discrepâncias pode ser observado na Equação 3, onde n é o número de pontos de checagem (amostragem) e pj é o número índice do ponto que está sendo verificado nas Equações 1 ou 2.

$$disc_{2D} = \sqrt{(X_{test} - X_{ref})^2 + (Y_{test} - Y_{ref})^2} \tag{1}$$

$$disc_z = Z_{test} - Z_{ref} \tag{2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (disc_{pj})^2}{n}} \tag{3}$$

No Brasil, a qualidade posicional de produtos cartográficos é definida pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) definido no Decreto nº. 89.817 de 20 de junho de 1984, publicado no Diário Oficial da União de 22 de junho de 1984, que regulamenta a classificação dos produtos cartográficos quanto à acurácia posicional (BRASIL, 1984). Em 2016, a Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (DSG) elaborou a Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG) para atender ao Decreto nº. 6.666/2008 (Brasil, 2008), que prevê a implantação da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), e tem como principal objetivo fornecer uma forma padronizada de avaliação da qualidade dos produtos do grupo de dados geoespaciais integrantes do Sistema Cartográfico Nacional (SCN) brasileiro.

A Tabela 1 apresenta os valores de tolerância para avaliação da acurácia posicional planialtimétrica de acordo com o Decreto nº 89.817 (Brasil, 1984) e ET-CQDG (DCT/DSG, 2016).

Tabela 1 – Tolerâncias utilizadas para avaliação da precisão posicional do método planialtimétrico.

Classe		Planimétrica		Altimetria (MTD 1:1.000)	
DECRETO 89.817	ET-CQDG	PEC ou PEC-PCD	EP ou PED	PEC ou PDC	EP ou PED
-	A	0,28 mm x s	0,17 mm x s	0,27m	0,17m
A	B	0,50 mm x s	0,30 mm x s	0,50m	0,33m
B	C	0,80 mm x s	0,50 mm x s	0,60m	0,40m
C	D	1,00 mm x s	0,60 mm x s	0,75m	0,50m

Onde: Classe=classe conforme DECRETO 89.817 (Brasil, 1984) (A, B e C) ou ET-CQDG (DCT/DSG, 2016) (A, B, C e D); Planimétrico=avaliação de parâmetros planimétricos; Altimetria (MTD 1:1.000)=avaliação de parâmetros altimétricos para Modelo Digital de Terreno compatível com a escala 1:1.000; PEC=Padrão de Exatidão Cartográfica; EP=Erro Padrão; PEC-PCD=Padrão de Exatidão Cartográfica - Padrão Cartográfico Digital; PED=Padrão do Erro Digital; s=escala de referência do mapeamento (por exemplo: 1:1.000, 1:2.000, 1:10.000; mm=milímetros; m=metros).

Fonte: Decreto nº 89.817 (Brasil, 1984) e ET-CQDG (DCT/DSG, 2016).

Duas condições devem ser atendidas para a classificação da acurácia posicional de um produto cartográfico:

- (i) Noventa por cento dos pontos coletados em dados espaciais devem apresentar valores de discrepância ($disc$) iguais ou inferiores ao valor do PEC-PCD, em relação à escala e classe testada quando as coordenadas são comparadas com coordenadas levantadas em campo com método mais preciso, conforme Equação 4. O DPPC (desvio padrão de pontos de controle) é a diferença entre as coordenadas de teste obtidas dos dados espaciais X_{test}, Y_{test} ou Z_{test} e as coordenadas de referência X_{ref}, Y_{ref} ou Z_{ref} , obtidas em campo respectivamente.

$$90\% (disc) \leq PEC-PCD \tag{4}$$

- (ii) O RMSE (*Root Mean Square Error*) das amostras das discrepâncias, baseado em ASPRS (2015) e Zanetti, Braga e Santos (2018), deve ser menor ou igual ao PED (Padrão de Exatidão Cartográfica) em relação à escala e classe testada, de acordo com a Equação 5.

$$RMSE (disc) \leq PEC \tag{5}$$

Antes de avaliar a acurácia posicional da nuvem de pontos do scanner a laser, o número de pontos de checagem necessários foi determinado e sua distribuição espacial foi avaliada. A primeira etapa da Fase 3 começou com a determinação do número de pontos de checagem e sua distribuição espacial.

Para tanto, foi utilizado o procedimento de lote isolado da Norma da ET-CQDG (DCT/DSG, 2016). Segundo a ET-CQDG (DCT/DSG, 2016), o tamanho do lote deve ser definido através da determinação das células válidas, onde cada célula válida corresponde a um elemento da população. A norma sugere que o produto a ser avaliado seja particionado em células de 4 x 4 cm na escala do projeto. Inicialmente, a nuvem foi avaliada na escala 1:1000, resultando na divisão em células de 40 x 40 m no solo. Pode-se observar na Figura 4 que as bordas possuem células menores que 40 m, de forma que todas as células ficam dentro do limite da área mapeada.

Dessa forma, foram determinados 68 lotes com dimensões de 40 por 40 m e 5 lotes menores. A soma das áreas das células menores corresponde a células de 40x40 m, totalizando 73 lotes na nuvem de pontos, conforme mostra a Figura 4.

Definido o tamanho do lote, o tamanho da amostra foi determinado a partir da tabela ISO 2859-2 (ISO, 1985) e adaptado à ET-CQDG (DCT/DSG, 2016). A amostra foi então avaliada por Lote Isolado, convertendo NQL (limite de qualidade aceitável) em QL (limite de qualidade).

Com base na Tabela 2, no tamanho do lote igual a 73 e o valor de AQL de 4% para o intervalo que compreende o tamanho do lote, o resultado obtido foi um QL de 20%. Posteriormente, utilizou-se a Tabela 3, inserindo o valor de QL de 20% para o mesmo intervalo que compôs o tamanho do lote, obtendo-se um tamanho amostral de 10 (dez) pontos de checagem, sendo que nenhum deles poderiam ser descartados.

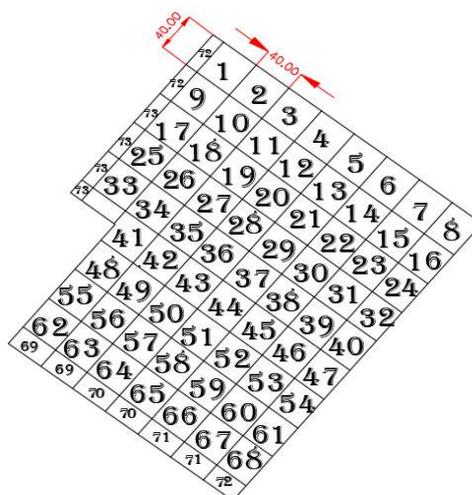


Figura 3 – Imagem esquemática dos 73 lotes, com dimensões de 40 x 40 m. Fonte: Autores (2024).

Lot size	AQL (%)		
	1,0	4,0	10
16 to 25	12,5	32	32
26 to 50	12,5	20	32
51 to 150	8,0	20	32
151 to 1200	5,0	20	32
1201 to 10 000	3,15	12,5	20
10 001 to 150 000	3,15	8,0	20
150 001 and larger	2,0	8,0	20

Figura 4 – Determinação do Limite de Qualidade e (QL) em %. Fonte: DCT/DSG (2016) e ISO 2859-2 (ISO, 1985).

Lot size		Quality limit (QL) in %								
		0,8	1,25	2,0	3,15	5,0	8,0	12,5	20	32
16 to 25	n	↓	↓	↓	↓	↓	17	13	9	6
	Ac	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26 to 50	n	↓	↓	↓	50	28	22	15	10	6
	Ac	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51 to 90	n	↓	↓	50	44	34	24	16	10	8
	Ac	0	0	0	0	0	0	0	0	0
91 to 150	n	↓	90	80	55	38	26	18	13	13
	Ac	0	0	0	0	0	0	0	0	1
151 to 280	n	170	130	95	65	42	28	20	20	13
	Ac	0	0	0	0	0	0	0	1	1
281 to 500	n	220	155	105	80	50	32	32	20	20
	Ac	0	0	0	0	0	0	1	1	3
501 to 1200	n	255	170	125	125	80	50	32	32	32
	Ac	0	0	0	1	1	1	1	3	5
1201 to 3200	n	280	200	200	125	125	80	50	50	50
	Ac	0	0	1	1	3	3	3	5	10
3201 to 10 000	n	315	315	200	200	200	125	80	80	80
	Ac	0	1	1	3	5	5	5	10	18
10 001 to 35 000	n	500	315	315	315	315	200	125	125	↑
	Ac	1	1	3	5	10	10	10	18	↑
35 001 to 150 000	n	500	500	500	500	500	315	200	↑	↑
	Ac	1	3	5	10	18	18	18	↑	↑
150 001 to 500 000	n	800	800	800	800	↑	↑	↑	↑	↑
	Ac	3	5	10	18	↑	↑	↑	↑	↑
500 001 and larger	n	1250	1250	1250	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	Ac	5	10	18	↑	↑	↑	↑	↑	↑

Figura 5 – Definição do tamanho da amostra, conforme Limite de Qualidade (QL) em%.

Fonte: DCT/DSG (2016) e ISO 2859-1 (ISO, 1999).

Portanto, utilizando o procedimento de lote isolado da normativa ET-CQDG (DCT/DSG, 2016), foram selecionados 10 (dez) pontos de checagem para validar a nuvem de pontos LST. No entanto, neste estudo, optou-se por utilizar um número maior de pontos de verificação para obter uma amostra maior do que o sugerido pelo princípio do lote isolado da ET-CQDG (DCT/DSG, 2016).

Para uma análise mais rigorosa, foi decidido que seriam utilizados 29 (vinte e nove) pontos de checagem para avaliar a acurácia posicional da nuvem de pontos do scanner a laser.

Na segunda etapa da Fase 3, foi utilizado o método estatístico Função *K de Ripley* para determinar o comportamento da distribuição espacial dos pontos de checagem, conforme sugerido e apresentado no estudo de Santos *et al.* (2016b).

Para a geração do Gráfico de Função *K de Ripley* foi utilizado o software ArcGIS Desktop, e os dados de entrada foram dois arquivos no formato shapefile: um referente às coordenadas planimétricas dos pontos de checagem e outro referente ao limite da área pesquisada. Um gráfico foi utilizado para analisar a função *K*, conforme mostrado na Figura 5. A linha azul no gráfico mostra o padrão esperado (aleatório), a linha vermelha representa o padrão observado e a linha pontilhada cinza representa o nível de confiança. Percebe-se que para o conjunto de pontos de checagem utilizados, a distribuição espacial apresentou um padrão aleatório, uma vez que os pontos observados estão dentro do intervalo de confiança do padrão esperado.

Diante dos resultados obtidos, evidenciou-se que os pontos de checagem estavam bem distribuídos para validar a nuvem de pontos LST.

Dessa forma, iniciou-se a terceira etapa da Fase 3, onde foi realizado o levantamento dos pontos de checagem utilizando receptores GNSS.

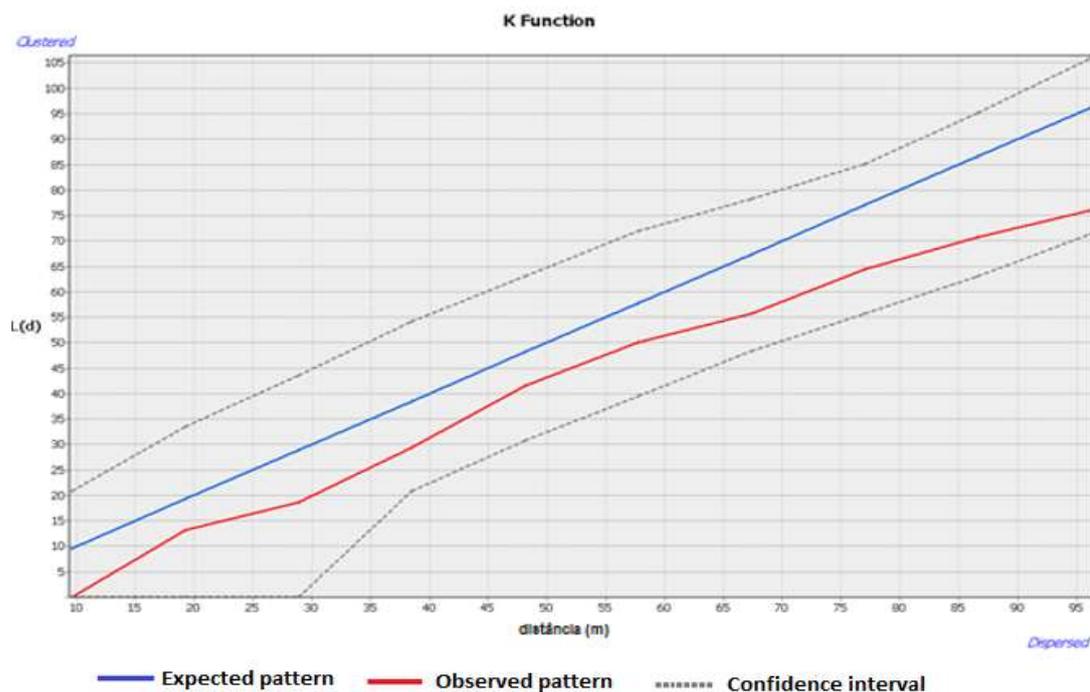


Figura 6 – Resultado da análise da Função K de Ripley para pontos de verificação pesquisados via GNSS para validar a nuvem de pontos TLS.

Fonte: Autores (2024).

Na quarta etapa da Fase 3, iniciou-se a avaliação da acurácia posicional da nuvem de pontos LST. Antes desta avaliação, os dados LST foram georreferenciados no mesmo sistema de coordenadas de projeção dos dados GNSS. Para definir os pontos de controle, foram escolhidos locais bem identificáveis (por exemplo, cantos de meio-fio e faixa de pedestres), que continham um ponto na nuvem do LST. Após ter este ponto de checagem na nuvem do LST, seu ponto homólogo foi coletado em campo com receptores GNSS.

O processo de acurácia posicional foi aplicado aos dados para analisar a amostra de discrepâncias posicionais obtidas a partir de feições pontuais. Primeiramente, foi utilizado o método 3σ para detecção de outliers, conforme recomendado por Nero (2005). Posteriormente, foi realizada análise de tendência por meio do teste *t de Student* e estatística espacial da Média Direcional e Variância Circular (Santos *et al.*, 2016b). Como o teste *t de Student* é aplicado apenas para dados que seguem distribuição normal, foi utilizado o teste de normalidade de Jarque-Bera com nível de confiança de 95%, conforme apresentado por Nero (2005). Por fim, a acurácia posicional foi avaliada aplicando-se o padrão de acurácia posicional definido pelo Decreto 89.817 (Brasil, 1984) em conjunto com a ET-CQDG (CONCAR, 2011; DCT/DSG, 2016) para a escala de estudo. Inicialmente foi utilizada uma escala de 1/1000. Caso o produto não fosse classificado na Classe A, a escala seria alterada até atingir o nível máximo da escala, no qual o resultado retornaria à Classe A. Além da avaliação das feições pontuais, a nuvem de pontos do LST foi validada utilizando o método de feições lineares aplicando o Buffer Duplo, com base em Santos *et al.* (2015, 2016a). Foram coletadas seis feições lineares, variando entre feições retas e feições curvas, conforme Figura 6.

As feições lineares de referência foram coletadas em campo através de pontos com equidistância a cada 1 m para segmentos curvos e equidistância a cada 3 m e a cada 10 m para segmentos retos. Posteriormente, foi feito o desenho ligando esses pontos formando assim as feições lineares de referência. Na nuvem de pontos do LST, as feições lineares homólogas (feições de teste), foram vetorizadas utilizando as ferramentas de desenho ArcGIS. O comprimento máximo das feições lineares foi de 240 m e o mínimo foi de 8 m.

3. Análise de resultados

3.1 Método das Feições Pontuais

Com as coordenadas dos pontos de checagem coletadas em campo e suas homologas extraídas da nuvem de pontos do LST, as discrepâncias foram calculadas por meio do software GeoPEC, versão 3.6 (SANTOS, 2023).

O gráfico da Figura 7 mostra os valores de discrepância das componentes E, N e h (Altitude Geométrica). A Figura 8 mostra o resultado da discrepância posicional com a discrepância altimétrica.

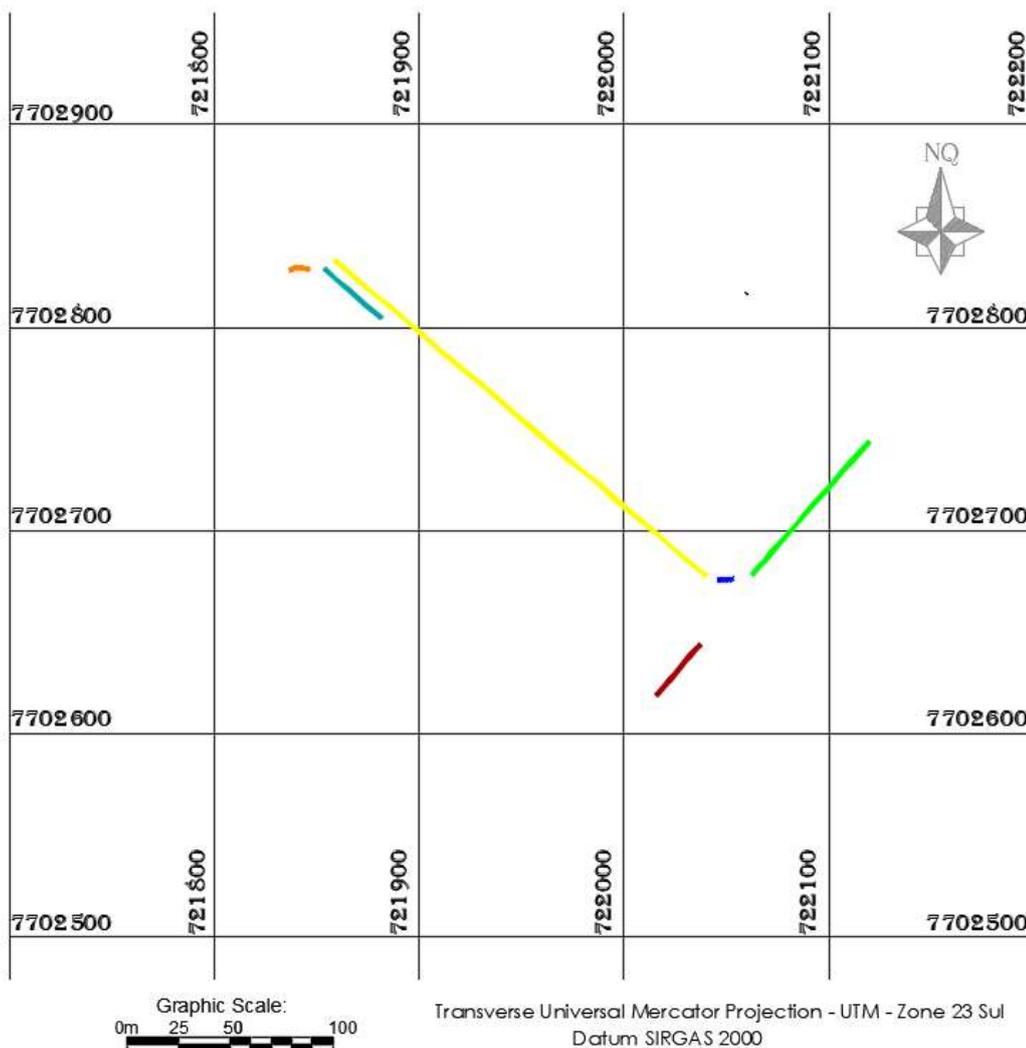


Figura 7 - Distribuição das feições lineares determinadas por GNSS.

Fonte: Autores (2024).

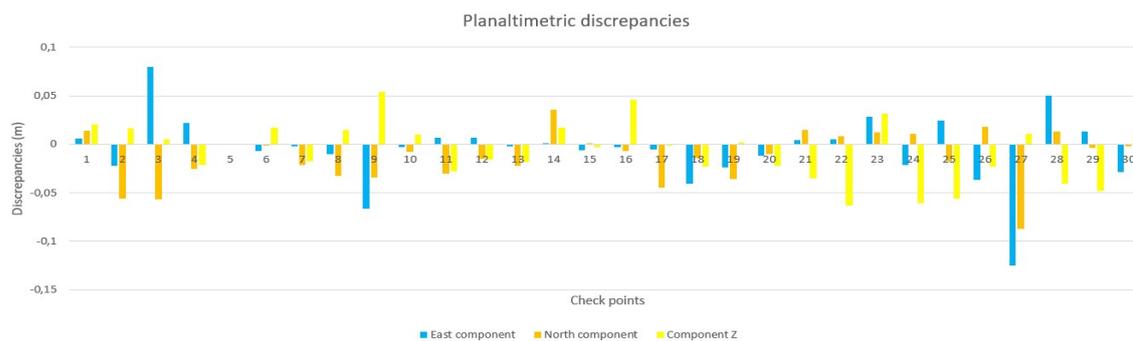


Figura 8 – Gráfico das discrepâncias planialtimétricas (m) das feições pontuais obtidas pelo levantamento GNSS e suas feições homólogas na nuvem do scanner a laser.

Fonte: Autores (2024).

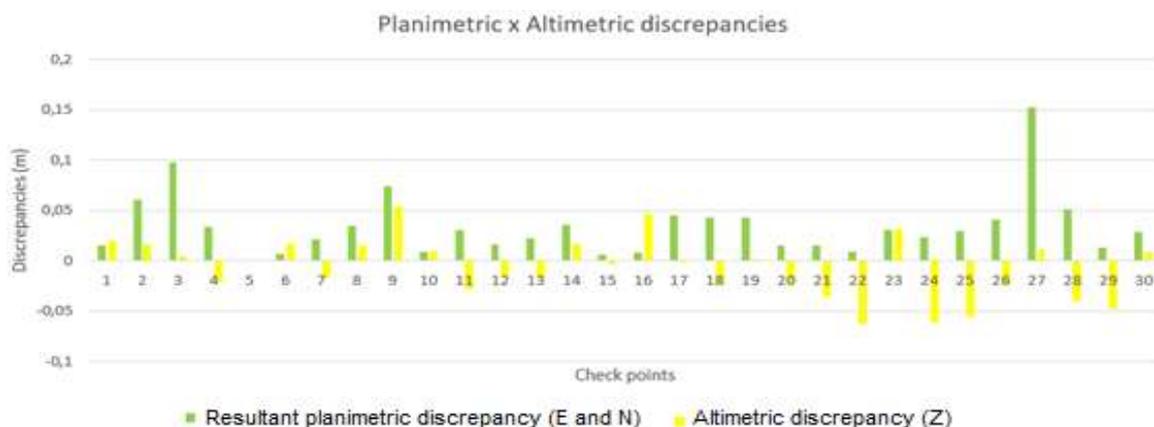


Figura 9 – Gráfico das discrepâncias planimétricas e altimétricas resultantes (m) das feições pontuais obtidas através do levantamento GNSS e suas feições homólogas na nuvem do scanner a laser.

Fonte: Autores (2024).

Empregando o limite de 3σ para a escala 1/280, constatou-se que não houve outliers na amostra de discrepâncias entre as coordenadas extraídas da nuvem de pontos e as coletadas em campo.

Posteriormente, foi aplicado o teste de normalidade de Jarque-Bera (Bowman-Shelton) para verificar se a amostra apresentava distribuição normal ou não. O resultado estatístico indicou que tanto para a planimetria quanto para a altimetria as amostras não apresentaram uma distribuição normal. Para verificar a existência de tendência na nuvem de pontos foram utilizados os testes estatísticos *t de Student*, Média Direcional e Variância Circular. Como a amostra de dados não apresentou uma distribuição normal, utilizou-se os resultados da Média Direcional e da Variância Circular (ambos apresentados para o software GeoPEC) para analisar a existência de tendência. O valor da Média Direcional foi de $202,2717^\circ$ e da Variância Circular de 0,6757 (sem dimensão), evidenciando que tanto para a planimetria, quanto para a altimetria, a amostra não apresentou tendência (mais detalhes ver Santos et al., 2016b).

Após análise da acurácia posicional da nuvem de pontos do laser scanner, seguindo diretrizes de avaliação ET-CQDG (Brasil, 1984; CONCAR, 2011; DCT/DSG, 2016), a nuvem do LST foi classificada como Classe A, associada à escala de mapeamento de 1/280 para planimetria. A média planimétrica ($disc_{2D}$) da amostra foi de 0,035m, desvio de 0,031m, RMSE de 0,046m, valor de discrepância máxima de 0,152m e discrepância mínima de 0,006m. É importante ressaltar que a escala 1/280 foi a escala máxima que satisfaz a classe A da PEC-PCD.

Com os valores acima, pode-se concluir que não devemos observar apenas o valor da acurácia do LST, que é de 5 mm (acurácia nominal do LST de acordo com o fabricante), pois toda posição do TLS foi referenciada no levantamento com o RTK. Assim, há uma propagação da variação da incerteza do laser scanner, da incerteza do RTK e da linha de base. Assim,

o valor RMSE obtido na avaliação da acurácia posicional do LST torna-se compatível com todas as incertezas geradas no processo.

Na avaliação da acurácia posicional altimétrica da nuvem do LST foram definidas curvas com equidistância de 0,30 m, dessa forma estabeleceram-se os limites máximos de erro para PEC/ET-CQDG “Classe A” em 0,081 m e o Erro-padrão em 0,050 m. Assim, verificou-se que 100% das discrepâncias estavam dentro dos limites do PEC, e o RMSE de 0,031m foi menor do que o EP da escala para essa classe. Assim, os MDTs podem ser classificados como “Classe A” para utilização em escala 1:280 ou menor. A Tabela 4 apresenta os dados estatísticos da avaliação planimétrica e a Tabela 5 apresenta os dados referentes à avaliação altimétrica da referida amostra.

Tabela 2 – Dados estatísticos que avaliam a precisão posicional planimétrica da nuvem de pontos LST.

Itens analisados		Resultados
Tamanho da amostra (n)		29
Dado espacial é agrupado?? (Função K)		Não
Número de outliers		0
A amostra é tendenciosa?		Não
A amostra apresenta distribuição normal?		Não
Média (disc 2D)		0,035m
Desvio padrão (disc 2D)		0,031m
RMSE (disc 2D)		0,046m
Resultante de Discrepâncias Planimétricas	Valor máximo	0,152m
	Valor mínimo	0,006m
PEC-PCD (1:280 – Classe A)		0,078m
EP (1:280 – Classe A)		0,048m
% de discrepância \leq PEC		93,1%
RMSE \leq EP		Sim
Os dados espaciais são precisos? (Em atendimento ao Decreto 89.817/ET-CQDG)		Sim

Fonte: Autores (2024).

Tabela 3 – Dados estatísticos que avaliam a precisão posicional altimétrica da nuvem de pontos LST.

Itens analisados		Resultados
Tamanho da amostra (n)		29
Dados espaciais agrupados? (Função K)		Não
Número de outliers		0
A amostra é tendenciosa?		Não
A amostra apresenta distribuição normal?		Não
Média (discz)		-0,008m
Desvio padrão (discz)		0,030m
RMSE (discz)		0,031m
Discrepância	Valor máximo	0,054m
	Valor mínimo	- 0,063m
PEC-PCD (eq 0,30m – Classe A)		0,081m
EP (eq. de 0,30m – Classe A)		0,050m
% de discrepância \leq PEC		100%
RMSE \leq EP		Sim

Fonte: Autores (2024).

3.2 Método das Feições Lineares

Após avaliação dos pontos, utilizou-se o método de feições lineares, através da abordagem de incerteza do método Double Buffer (SANTOS *et al.*, 2015). Neste artigo, foi utilizado o método feições pontuais (ver item 3.1) para uma

avaliação mais detalhada, com detecção de outliers, análise de normalidade, tendência e distribuição espacial, bem como classificação de qualidade pela norma brasileira. O método de feição linear foi utilizado apenas para análise de qualidade com aplicação da norma brasileira. Contudo, foram acrescentadas ao texto as estatísticas descritivas da amostra de discrepâncias posicionais obtidas pelo método Double Buffer. A média planimétrica ($disc_{2D}$) foi de 0,046m, desvio de 0,012m, RMSE de 0,047m, valor máximo da discrepância de 0,061m e discrepância mínima de 0,026m. A nuvem de pontos do laser scanner apresentou a mesma classificação do método da avaliação das feições pontuais (Classe A para escala 1/280). A Figura 9 mostra discrepâncias em metros obtidos pelo método Double Buffer.

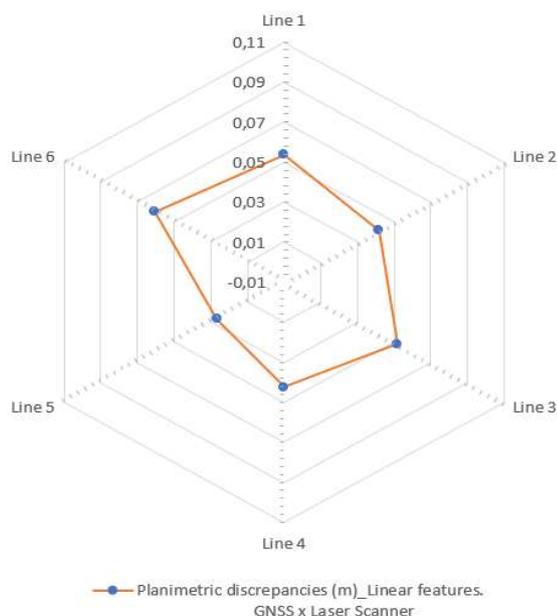


Figura 10 – Gráfico de discrepâncias (m), de feições lineares obtidas por levantamento GNSS e feições homólogas na nuvem de scanner a laser, utilizando o método Double Buffer.

Fonte: Autores (2024).

4. Considerações finais

Como o LST é utilizado como referência para diversos levantamentos, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a qualidade posicional do produto gerado pelo LST, onde se conhece a acurácia posicional da nuvem de pontos gerada pelo equipamento.

Um aspecto importante é a densidade da nuvem de pontos que neste estudo foi de cerca de quatro pontos por metro quadrado. O resultado obtido na avaliação da acurácia posicional da nuvem de pontos do LST, utilizando o método por feições pontuais, alcançou Classe A para uma escala de 1/280 em planimetria. Na altimetria, a nuvem foi classificada como Classe A para curvas de nível com equidistância vertical de 0,30 m. Ambos os casos seguiram as diretrizes de avaliação do Decreto nº 89.819 (Brasil, 1984) e da ET-CQDG (CONCAR, 2011; DCT/DSG, 2016). Os resultados indicam que, após a classificação da nuvem de pontos, ela pode ser utilizada como um produto de referência para avaliações futuras e na análise de tendências constatou-se que os dados das nuvens de pontos do TLS estão livres de efeitos sistemáticos, ou seja, não há deslocamento na direção E (Leste) ou N (Norte). O método Double Buffer foi aplicado através de características lineares para avaliar a precisão da nuvem de pontos do laser scanner, e os resultados obtidos foram os mesmos obtidos na análise das feições pontuais.

Além disso, novas pesquisas sugerem a validação desses aqui apresentados, replicando-os para uma área mais ampla com topografia irregular e vegetação densa, bem como com testes de posicionamento com mais técnicas de processamento, tais como o PPP (Posicionamento de Ponto Preciso) com diferentes condições, por exemplo.

Por fim, outra sugestão seria a aplicação dos processos de simulação desses dados com as funções aqui apresentadas (K de Ripley, entre outras), em conjunto com aquelas aplicadas por diversos autores, além de considerar a distribuição da amostra por pesos e variáveis.

Referências

- Alves, S. S. O., Rodríguez, F. A. C., Sampaio, L. F., Medeiros, L. I. B., Veiga, L. A. K., Klein, I. 2020. Avaliação Laboratorial da Parametrização de Dados LST em Superfícies Planas. *Revista Brasileira de Cartografia*, 72 (3), 384-398.
- Ariza-López, F.J. 2002. *Calidad en la Producción Cartográfica*. 1. ed. Madrid, Espanha: RaMa. 389p. ISBN 84-7897-524-1.
- Ariza-López, F.J., Atkinson-Gordo, A.D. 2008. Analysis of Some Positional Precision Assessment Methodologies. *Journal of Surveying Engineering*, 134 (2). American Society of Civil Engineers: p 45–54.
- Ariza-López, F. J., Atkinson-Gordo, A. D. J., Nero, M. A. and Cintra, J. P. 2007. La Componente Posicional de los Datos Geográficos: análisis crítico de los Métodos de Evaluación y Reporte en Hispanoamérica. *Revista Cartográfica*, 83, 95-152.
- ASPRS - American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81 (3), A1-A26.
- Botelho, M. F, Centeno, J. A. S. 2011. Reconstrução tridimensional de edificações utilizando dados laser scanner aerotransportados. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 13 (1), 107-126.
- Brasil. 1984. Decreto N° 89.817 de 20 de junho de 1984. *Normas Técnicas Da Cartografia Nacional*. Brasil. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm. Accessed in: January 2017.
- Centeno, J. A. S., Peixoto, E. B. A. 2023. Descritores de Forma 3D para Classificação de Objetos em Nuvens de Pontos Lidar Terrestres. *Rev. Geociênc. Nordeste, Caicó*, v.9, n.2, p.156-169.
- Cintra, J. P., Gonçalves, R. 2017. Topografia de túneis com laser scanner terrestre: estudo de caso. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 23 (1), 115-133.
- Cintra, J. P., Nero, M. A. 2005. Proposta de interpretação e sugestão de complemento da norma de controle de qualidade brasileira. In: XXII Congresso Brasileiro de Cartografia, Macaé (RJ). Sociedade Brasileira de Cartografia.
- CONCAR. 2011. *Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais*. Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais. Brazil. 2011. 2.ed.
- DCT/DSG – Departamento de Ciência e Tecnologia / Diretoria do Serviço Geográfico. 2016. *Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG)*. Brazil, 1 Edição.
- Elaksher, A.; Ali, T.; Alharthy, A. 2023. A Quantitative Assessment of LIDAR Data Accuracy. *Remote Sens.* 15, 442. <https://doi.org/10.3390/rs15020442>.
- Fonseca Neto, F. D., Gripp Júnior, J., Botelho, M. F., Santos, A. P., Nascimento, L. A., Fonseca, A. L. B. 2017. Avaliação da qualidade posicional de dados espaciais gerados por VANT utilizando feições pontuais e lineares para aplicações cadastrais. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 23 (1), 134-149.
- ISO. ISO 2859-1:1999. *Sampling procedures for inspection by attributes - Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection*. International Organization for Standardization (ISO), 1999.
- ISO 2859-2:1985. *Sampling procedures for inspection by attributes - Part 2: Sampling plans indexed by limiting quality (LQ) for isolated lot inspection* (ISO,1985).
- Lenartovicz, I. R. 2013. *Avaliação da Potencialidade do laser scanner terrestre no monitoramento de estruturas: estudo*

- de caso UHE Mauá*. 125 p. Tese (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.
- Martins Neto, R. P., Buck, A. L. B., Silva, M. N., Lingnau, C., Machado, A. M. L., Pesck, V. A. 2013. Métodos para avaliação da resolução de sistemas de varredura a laser terrestres. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 19 (3), 420-433.
- Nascimento Júnior, J. O., Schuler, C. A. B., Cavalcante, R. B. 2006. Sistema Laser Scanner. In III Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. Aracaju.
- Nero, M. A. 2005. *Propostas para o controle de qualidade de bases cartográficas com ênfase na componente posicional*. 187 p. Tese (Doutorado Departamento de Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP. São Paulo.
- Nero, M. A., Cintra, J. P., Ferreira, G. F., Pereira, T. A. J., Faria, T. S. 2017. A computational tool to evaluate the sample size in map positional precision. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 23 (3), 445-460.
- Pirotti, F., Guarnieri, A., Vettore, A. 2012. State of the Art of Ground and Aerial Laser Scanning Technologies for High-Resolution Topography of the Earth Surface. AIT the Italian Society of Remote Sensing, Itália, 46 (1), 66-78.
- Rottensteiner, F., Briese, C. 2002 A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LIDAR data. *IAPRSIS*, Vol 34/3A, Graz, Austria, pp. 295-301.
- Santos, A. P., Medeiros, N. G., Santos, G. R., Rodrigues, D. D. 2015. Controle de qualidade posicional em dados espaciais utilizando feições lineares. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 21 (2), 233-250.
- Santos, A. P., Medeiros, N. G., Santos, G. R., Rodrigues, D. D. 2016a. Avaliação da acurácia posicional planimétrica em modelos digitais de superfície com o uso de feições lineares. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 22 (1), 157-174.
- Santos, A. P., Rodrigues, D. D., Santos, N. T., Gripp Júnior, J. 2016b. Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais utilizando técnicas de estatística espacial: proposta de método e exemplo utilizando a norma brasileira. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 22 (4), 630-650.
- Santos, A. P. 2023. GeoPEC versão 3.6. Available at: <<http://www.geopec.com.br/>>. Accessed in: January 2024.
- Staiger, R. 2003. Terrestrial Laser Scanning Technology, Systems and Applications. In: Second FIG Regional Conference, Marrakech, Morocos, December 2003.
- Tan, Y.; Liu, X.; Jin, S.; Wang, Q.; Wang, D.; Xie, X. 2024. A Terrestrial Laser Scanning-Based Method for Indoor Geometric Quality Measurement. *Remote Sens.*, 16, 59. <https://doi.org/10.3390/rs16010059>
- Voordendag A, Goger B, Klug C, Prinz R, Rutzinger M, Sauter T and Kaser G . 2023. Uncertainty assessment of a permanent long-range terrestrial laser scanning system for the quantification of snow dynamics on Hintereisferner (Austria). *Front. Earth Sci.* 11:1085416. doi: 10.3389/feart.2023.1085416
- Vosselman, G., Dijkman, S. 2001. 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans. XXXIV International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 32-3/W4, Annapolis, Maryland, pp. 37-43.
- Wutke, J. D., Centeno, J. A. S. 2007. Métodos para avaliação da resolução de sistemas de varredura a laser terrestres. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 13 (1), 151-164.
- Zanetti, J.; Braga, F. L. S.; Santos, A. P. 2018. Comparativo das normas de controle de qualidade posicional de produtos cartográficos do Brasil, da ASPRS e da OTAN. *Revista Brasileira de Cartografia*, 70 (1), 359-390.