

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE POSICIONAL DE VARREDURAS LASER TERRESTRE PARA APLICAÇÕES EM ARQUITETURA

EVALUATION OF THE POSITIONAL QUALITY OF TERRESTRIAL LASER SCANS FOR ARCHITECTURAL APPLICATIONS

 Samir de Souza Oliveira Alves ¹

 Luis Augusto Koenig Veiga ²

 Alex Soria Medina ³

¹ Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, samirsoalves@hotmail.com

² Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, kngveiga@gmail.com

³ Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, asmedina@ufpr.br

Resumo

Um tema de destaque atual na arquitetura e construção é a captura da realidade, um processo de digitalização do mundo real usando diferentes tecnologias de medição 3D, permitindo a expressão da realidade em diferentes etapas de um projeto e consistindo em uma ferramenta importante na construção de sistemas BIM (Building Information Modeling). Um dos principais equipamentos na obtenção destes dados 3D são os Lasers Scanners Terrestres (LST) que permitem a geração das nuvens de pontos. Entretanto, como todo instrumento de mensuração, os LST e a prática de varredura *laser* apresentam limitações. Sendo assim, as observações coletadas contêm incertezas que devem ser avaliadas para utilização como dados na modelagem digital do objeto de interesse. Desta forma é preciso avaliar a qualidade posicional das coordenadas obtidas em um levantamento *laser* para que seja possível entender como se propagarão no produto final. Neste trabalho é apresentada uma metodologia de verificação da qualidade das coordenadas de uma varredura *laser* terrestre, utilizando o LST BLK360 Leica. Foram empregados pontos de controle para o registro e determinação do sistema de referência dos dados. Posteriormente, as coordenadas dos pontos de verificação, registradas nas nuvens de pontos, foram comparadas com os dados obtidos por um levantamento topográfico com a estação total Leica TS15 de alta precisão, e avaliados estatisticamente. A estimativa da qualidade da nuvem registrada passa pela interpolação das coordenadas dos centros dos alvos de controle, pois estas são comparadas com as coordenadas obtidas através de posicionamento por irradiação tridimensional, empregando-se a estação total. O método de interpolação e a densidade da nuvem tiveram influência na avaliação da qualidade posicional na nuvem registrada, sendo que se utilizando alta densidade de amostragem com o LST e interpolação, através dos valores médios para as coordenadas dos alvos, a qualidade do posicionamento foi melhor que 6mm para o presente estudo de caso.

Palavras-chave: *laser scanner* terrestre, qualidade posicional, modelagem tridimensional.

Abstract

A prominent theme currently in architecture and construction is reality capture, a process of digitizing the real world using different 3D measurement technologies, allowing the expression of reality at different stages of a project and consisting of an important tool in the construction of systems. BIM (Building Information Modeling). One of the main pieces of equipment for obtaining this 3D data is the Terrestrial Laser Scanners (TLS) that allow the generation of point clouds. However, TLS and laser scanning practice have limitations like any measurement instrument. Therefore, the collected observations contain uncertainties that must be evaluated for data in the digital modeling of the object of interest. In this way, it is necessary to evaluate the positional quality of the coordinates obtained in a laser survey so that it is possible to understand how they will propagate in the final product. This work presents a methodology for verifying the quality of terrestrial laser scan coordinates using the TLS BLK360 Leica. Control points were used to record and determine the data reference system. Subsequently, the coordinates of the checkpoints recorded in the point clouds were compared with the data obtained by a topographic survey with the high precision Leica TS15 total station and statistically evaluated. The estimated quality of the recorded cloud passes through the interpolation of the coordinates of the centers of the control targets, as these are compared with the coordinates obtained through positioning by three-dimensional irradiation using the total station. The interpolation method and the cloud density influenced the assessment of positional quality in the recorded cloud. They used high sampling density with the TLS and interpolation through the average values for the coordinates of the targets. The positioning quality was better than 6mm for the present case study.


Keywords: terrestrial laser scanner, positional quality, tridimensional modeling.

Contribuição dos autores:

SSOA: conceituação, curadoria dos dados, análise formal, investigação, metodologia, validação, visualização, escrita - revisão e edição. **LAKV:** conceituação, análise formal, investigação, metodologia, administração de projeto, supervisão, validação, escrita - rascunho original. **ASM:** conceituação, análise formal, investigação, metodologia, validação, escrita - rascunho original.

Fomento: Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. **Declaração de conflito:** nada foi declarado.

Editor Responsável:

Regina Coeli Ruschel 

How to cite this article:

ALVES, S. de S. O.; VEIGA, L. A. K.; MEDINA, A. S. Avaliação da qualidade posicional de varreduras *laser* terrestre para aplicações em arquitetura. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 13, p. e022012, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v13i00.8659734>

Submitted 21.05.2020 – Approved 09.12.2021 – Published 04.03.2022

e022012-1 | **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 13, p. e022012, 2022, ISSN 1980-6809



Introdução

Algumas perguntas são frequentes na área de Arquitetura e Construção: quais as dimensões de um ambiente, como são os detalhes de uma fachada histórica, como está o andamento de um determinado projeto? Respostas para estas e outras questões podem ser obtidas com o auxílio da captura da realidade, um termo até recente, que busca expressar a possibilidade de realização de um levantamento tridimensional de um objeto ou área, sem a necessidade de tocá-los, trazendo mais segurança e criando melhores condições para a preservação, gerando informações digitais sobre os itens levantados (CINTRA; GONÇALVES, 2019). E, de acordo com Dinis *et al.* (2020), a captura da realidade também fornece dados para elaboração de produtos relacionados à realidade virtual, ambientes considerados mais intuitivos, interativos e compreensíveis para atender ao perfil de uma gama mais ampla de usuários.

O conceito de captura da realidade não é recente, sobretudo quando ponderamos a realização de técnicas de levantamentos topográficos tridimensionais e fotogramétricas, usadas há décadas, como a modelagem e construção de réplicas de peças e objetos de museus, explorados desde os anos 1960 (CINTRA; GONÇALVES, 2019).

A diferença está na forma como isto é executado, com a coleta de milhares de pontos por segundo, empregando-se equipamentos como *lasers scanner* terrestre (LST), por técnica conhecida como varredura a laser, e na forma de tratamento e obtenção de informações a partir deste volume de dados. Conforme indicado por Dinis *et al.* (2020), as varreduras por *laser scanner* e realidade virtual estão mutuamente conectadas, principalmente consideradas no desenvolvimento de projetos em ambientes BIM (*Building Information Modeling*).

São descritas em Leica Geosystems (2020), algumas razões para o uso da tecnologia de captura da realidade em atividades de Arquitetura:

- Obter dimensões precisas onde pode haver falta de planos *as-built*;
- Gerar visualizações precisas de um projeto com base na realidade do ambiente existente para ajudar a atender às aspirações arquitetônicas do cliente;
- Gerar, simular e testar modelos 3D para garantir que o projeto corresponda à realidade;
- Garantir a colaboração completa de design e progresso com todas as partes interessadas ao longo do projeto.

O LST vem se destacando quanto a estes múltiplos usos, com destaque à indústria da arquitetura, engenharia e construção, desde a reconstrução tridimensional de patrimônios históricos até as aplicações em aperfeiçoamento de atividades agrícolas (DINIS *et al.*, 2020; ARYAN; BOSCHÉ; TANG, 2021). O desenvolvimento e ampliação do uso da tecnologia *Laser Scanner*, em diversos campos da ciência, fomentam, entre outras atividades, a necessidade de estudos voltados às investigações das limitações e aplicabilidade de tais sistemas. A qualidade e precisão das informações obtidas passam necessariamente pela avaliação da precisão dos equipamentos utilizados no processo de captura.

Os levantamentos por LST tratam-se de uma técnica que visa a mensuração por método ativo e a determinação de pontos amostrais, que podem ser adquiridos atualmente a uma taxa superior a um milhão de pontos por segundo, graças aos avanços tecnológicos (WALTON; DELALOYE; DIEDERICH, 2014).

A varredura é realizada entorno da posição em que o instrumento foi instalado, com medidas de distâncias a partir do sensor *laser*, habitualmente denominado por *Light Detection And Ranging* (LIDAR) (WUTKE, 2006). Estas medidas são feitas sob intervalos regulares de ângulos verticais e horizontais. Dessa forma, são obtidas informações tridimensionais de objetos e/ou superfícies de interesse em um curto espaço de tempo (FUENTES SANTIBAÑEZ, 2010; SHAN; TOTH, 2018).

Para Canuto e Salgado (2020), esta técnica de levantamento, junto ao levantamento fotogramétrico, representam o estado da arte das técnicas que contribuí na geração de modelos geométricos precisos, rápidos e realistas, auxiliando na preservação e resgate das informações do patrimônio.

Canuto, Moura e Salgado (2016), apontam como uma das vantagens da utilização dos dados de varreduras *lasers* na manutenção e preservação dos patrimônios históricos e culturais, a possibilidade de modelagem da informação em plataformas de Modelagem da Informação da Construção BIM, e a experimentação em realidade aumentada e realidade virtual, podendo auxiliar em futuros resgates das informações projetuais perdidas. Cogima *et al.* (2020) destacam ainda que as varreduras *laser* como primeiro passo para a criação dos modelos inteligentes para as edificações históricas, seguido do processamento dos dados e finalizando com a modelagem BIM.

Em seu trabalho sobre o panorama atual da abordagem BIM, Checcucci (2019) indica que este processo de modelagem está presente em diversas fases do ciclo de vida da edificação, mas que a maioria está concentrada na etapa de projeto. De acordo com Grosskopf *et al.* (2019), os avanços tecnológicos no desenvolvimento dos LST e sensores imageadores contribuíram no aprimoramento da coleta de dados em campo de forma ampla, minimizando os riscos das informações das construções investigadas deixem de ser capturadas e modeladas.

Entretanto, apesar da qualidade geométrica oferecida pelo LST e a possibilidade de modelagem BIM dos elementos em diferentes níveis de detalhe (LoD – *Level of Detail*) (COGIMA *et al.*, 2020), os avanços tecnológicos não são capazes de evitar as imperfeições presentes nas montagens e construções destes instrumentos. Vosselman e Maas (2010), denominam como erros sistemáticos os efeitos destes fatores sobre os dados de varredura *laser*. Portanto, faz-se necessária a aplicação de métodos investigativos a fim de determinar as limitações impostas nestes sistemas.

Além dos possíveis erros decorrentes do próprio funcionamento do LST, como a incerteza no alcance do *laser* (*Range uncertainty*), influenciado pelo princípio de funcionamento para medição de distância e incerteza angular (*Angular uncertainty*), ocasionado pelas imperfeições dos mecanismos dos espelhos e dos medidores angulares, Walton, Delaloye e Diederichs (2014); Jaafar, Meng e Sowter (2017) e Staiger (2005) ressaltam outras fontes na qualidade posicional das nuvens de pontos. Os autores Walton, Delaloye e Diederichs (2014) apontam influências que vão desde as características das superfícies levantadas como: curvatura, orientação e superfície dos objetos mapeados, aos fatores ambientais, como: a refração e vibrações. Outros erros estão associados a pós-processamento dos dados de varredura, como o registro e/ou georreferenciamento das nuvens (WALTON; DELALOYE; DIEDERICHS, 2014).

Conforme apontado por Schulz (2007), trabalhos geodésicos aplicados à engenharia requerem, na maioria dos casos, precisão dos dados mensurados na ordem de milímetros. Portanto, os instrumentos usados devem ser calibrados para atender aos requisitos de precisão. Neste processo é determinada a viabilidade de aplicação da nuvem de pontos em demais projetos (VOSSELMAN; MAAS, 2010).

Embora o termo calibração seja empregado comumente em trabalhos que buscam avaliar a precisão de coordenadas obtidas com LST, o mais apropriado seria empregar o termo verificação. De acordo com INMETRO (2012), a prática de verificação dos instrumentos fornece a evidência objetiva de que uma dada característica satisfaz os requisitos especificados. Neste trabalho o instrumento foi testado para verificar se as medidas efetuadas atenderiam a determinado critério, sendo, neste caso, a precisão nominal do instrumento. Já a calibração estabelece, sob condições específicas, a correspondência entre o estímulo e a resposta de um instrumento de medir, sistema de medir ou mostrador de medição, resultando na determinação de modelos de correção a serem aplicados sobre as medidas efetuadas ou no próprio equipamento (FAGGION, 2001; INMETRO, 2012).

Em trabalhos voltados para plataformas BIM, as nuvens de pontos são os dados básicos para diversas atividades posteriores, como a extração de feições arquitetônicas de interesse, geração de ortoimagens, entre outros. Conhecer a qualidade posicional dos dados obtidos permite realizar uma avaliação da qualidade dos subprodutos, gerados a partir destes dados.

Desta forma, torna-se importante a avaliação do LST para atestar a qualidade posicional alcançável com o instrumento. Neste trabalho, foi realizada uma avaliação da qualidade posicional de um LST, modelo Leica BLK360, para obtenção de coordenadas bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), em alvos pré-definidos, obtidos a partir da nuvem de pontos. Para tal, foram confrontadas as coordenadas de pontos de verificação obtidas pelo LST, e as homólogas determinadas a partir de uma rede de pontos materializados em laboratório, que tiveram suas coordenadas definidas por meio de técnicas de irradiação topográfica tridimensional, empregando-se uma estação total robótica Leica TS15, com precisão superior ao LST. As discrepâncias calculadas foram avaliadas quanto a existência de tendências e a precisão com base na precisão nominal do instrumento.

Materiais e métodos

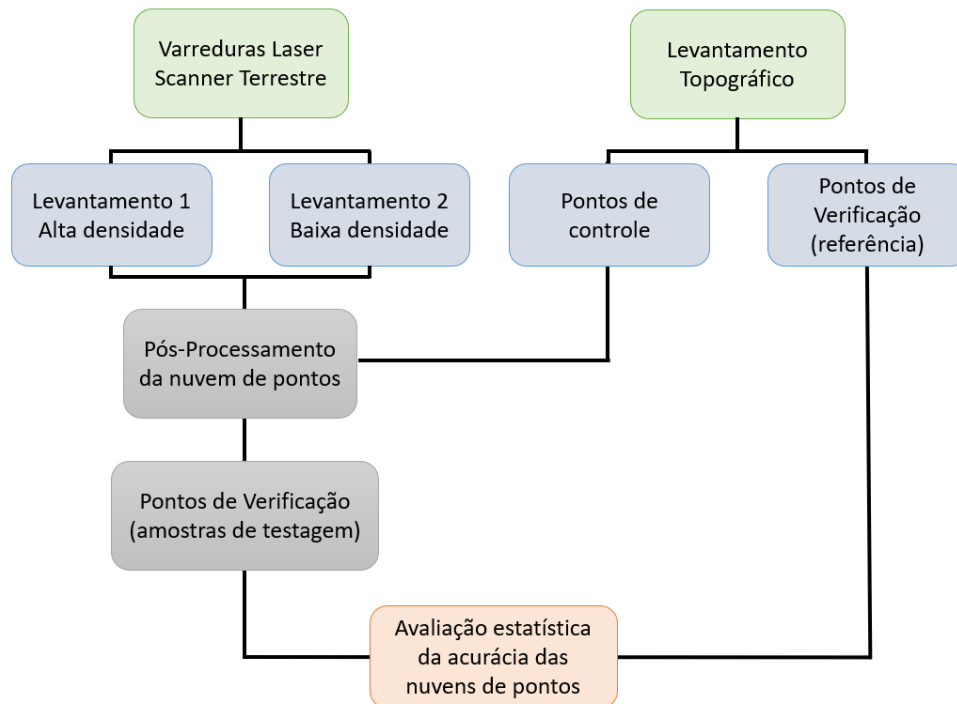
Neste item são abordadas as características dos instrumentos utilizados na pesquisa, bem como a metodologia empregada na verificação dos resultados obtidos. A Figura 1 apresenta um fluxograma das etapas adotadas na análise da acurácia das coordenadas tridimensionais, e distâncias obtidas a partir do LST. A primeira etapa está relacionada com a coleta de dados em laboratório, tanto das nuvens de pontos pelas varreduras com LST, como dos pontos de controle e de verificação por um levantamento topográfico, com uma estação total. Na segunda etapa foram realizados os processamentos e a extração das coordenadas dos pontos de verificação das nuvens, homólogos aos mensurados na primeira etapa com a estação total. Na terceira etapa foram feitos os testes de qualidade.

Instrumento

O LST empregado nos testes foi o LST BLK360, da Leica Geosystems, que possui uma unidade *laser* Classe 1, com comprimento da onda 830 nm e um prisma rotativo vertical em base rotativa horizontal. Além destes, o instrumento é composto por três câmeras HDR com 150 megapixels e uma câmera termográfica (LEICA GEOSYSTEMS, 2018).

Ao longo de cada varredura *laser*, a taxa de aquisição pode chegar a 360 mil pontos por segundo e, com alcance mínimo de superfícies de 60 cm e máximo de 60 m (LEICA GEOSYSTEMS, 2018). O sistema possibilita a realização da varredura em três modos, que influenciam tanto no tempo da aquisição dos dados, quanto na precisão dos pontos obtidos (Tabela 1).

Figura 1 – Fluxograma das etapas para avaliação da acurácia do LST



Fonte: os autores.

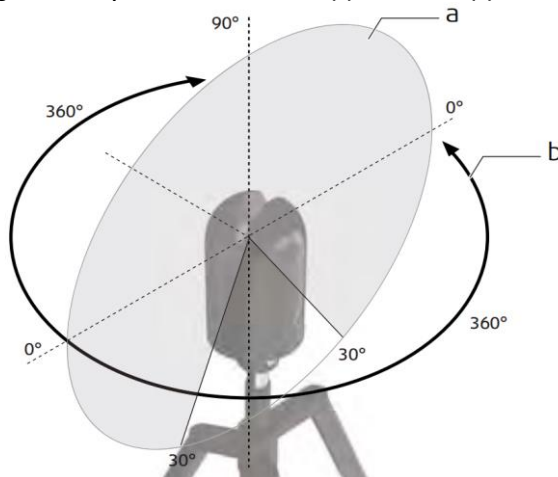
Tabela 1 –Estilo de formatação do artigo

Modo de escaneamento	Precisão (mm/10 m)	Duração do escaneamento (min)
Rápido	20	0,67
Padrão	10	1,83
Alta densidade	5	3,67

Fonte: Adaptado de LEICA GEOSYSTEMS (2018).

Os campos de visão vertical (a) e horizontal (b) de registro dos pontos, com varredura do laser de 300° e 360°, respectivamente, são representados na Figura 2.

Figura 2 – Campo de varredura vertical (a) e horizontal (b) do LST BLK360



Fonte: LEICA GEOSYSTEMS, 2018.

Na determinação das coordenadas dos pontos de controle, foi empregada uma estação total robótica de alta precisão, modelo TS15 da Leica Geosystems, que tem como características técnicas a precisão nominal de 1'' para medidas angulares e de ± (1 mm + 1,5 ppm) para medidas de distâncias com prismas, com comprimento de onda de 658

nm. No caso de outras superfícies (sem prisma), tal como utilizada neste trabalho, a precisão na mensuração de distâncias é de $\pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$ (LEICA GEOSYSTEMS, 2015).

Obtenção da nuvem de pontos e dos alvos

As varreduras com o LST foram realizadas no Laboratório de Geodésia Aplicada à Engenharia (GEENG), do Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Visando avaliar os impactos dos modos de escaneamento, conforme indicado pelo fabricante, realizou-se o primeiro levantamento com LST no modo alta densidade. O segundo levantamento se deu com varreduras no modo rápido, ou seja, baixa densidade.

Para o pós-processamento e análise estatística métrica, a partir da nuvem de pontos, distribuíram-se alvos no interior do laboratório. Sendo assim, o LST foi estacionado em 3 posições, definidas de modo que garantissem o recobrimento de todas as superfícies contendo os alvos e a sobreposição entre as nuvens de pontos. A presença de mais de uma estação implicou na necessidade de realização da união entre as nuvens, prática denominada por registro ou alinhamento de nuvens de pontos, comum a levantamentos de ambientes internos ou externos (VOSELMAN; MAAS, 2010).

Ao todo, 10 pontos de controle e 11 pontos de verificação foram dispostos pelo laboratório, e mensurados empregando-se uma estação total, em um sistema de referência local estabelecido. Segundo Schulz (2007), para registro entre nuvens de pontos é recomendado serem utilizados entre 4 e 6 alvos. O número de alvos destinados à avaliação da acurácia foi estipulado conforme outros estudos relacionados também à análise de qualidade de dados *laser*, como: Wutke e Centeno (2007), que utilizaram 6 alvos para avaliar a resolução de um LST; Borges *et al.* (2018) que utilizaram 9 alvos esféricos para investigar a precisão posicional do LST e Silva e Schulet (2015) que utilizaram 20 alvos ao todo, mas para avaliação de dados *laser* aerotransportado do bairro Macaxeira em Recife-PE, área muito superior ao investigado neste estudo.

A Figura 3 ilustra o alvo utilizado, impressos usando-se modelos fornecidos pelo fabricante do LST BLK360. Tratam-se de alvos circulares, impressos em papel fosco, com 15cm de diâmetro.

Figura 3 – Alvo preto e branco circular utilizado para o georreferenciamento e avaliação posicional



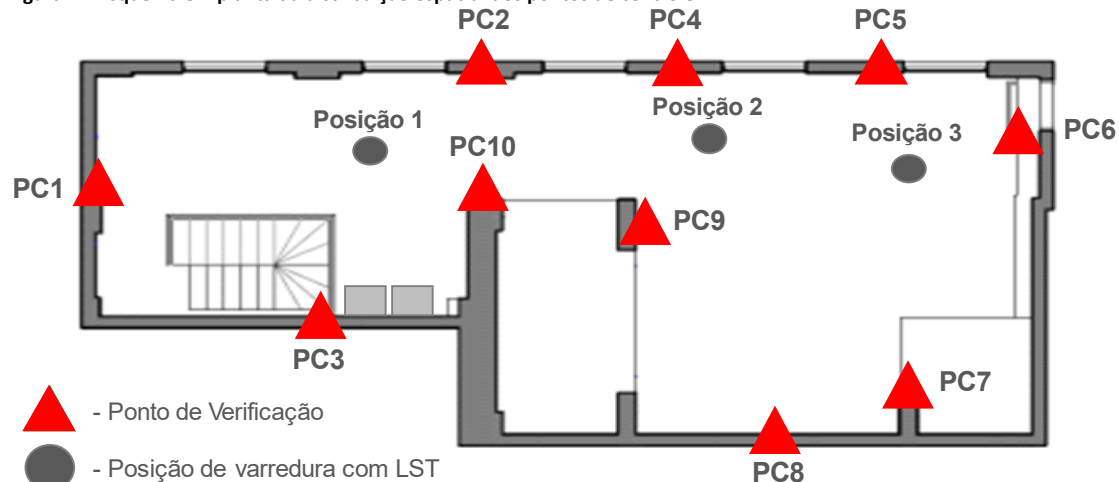
Fonte: os autores.

Cabe ressaltar que, para o posterior processo de avaliação da acurácia, os pontos derivados das varreduras com LST deveriam estar no mesmo sistema de referência com a amostra de verificação (levantada com a estação total). Logo, para a compatibilização dos referenciais, foi necessária a realização dos georreferenciamentos das nuvens. Além

do registro, o georreferenciamento de nuvens de pontos também é apontado como fonte de erro para as nuvens de pontos (WALTON; DELALOYE; DIEDERICH, 2014).

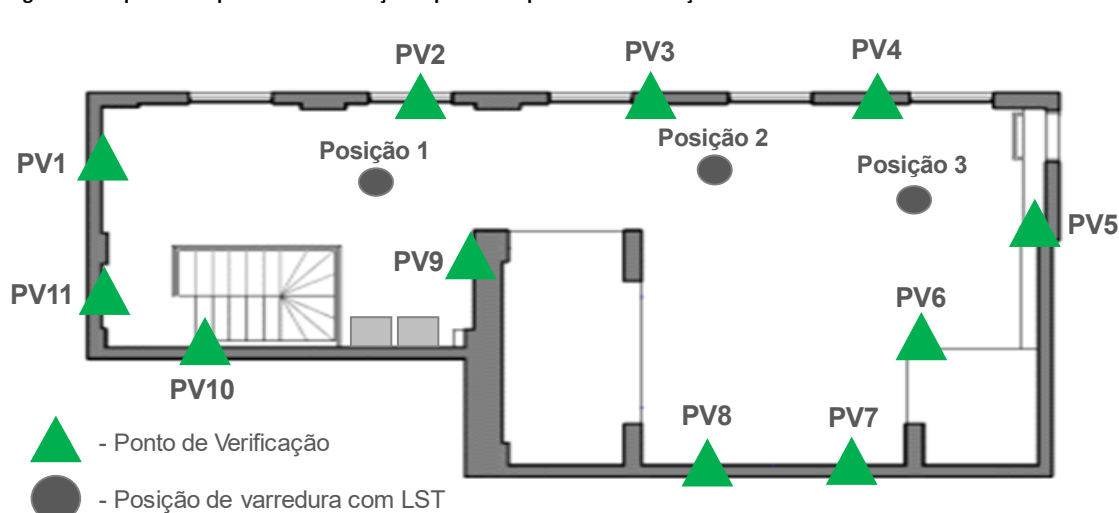
A Figura 4 ilustra a posição do LST em vista superior no momento da varredura e dos alvos, contendo os pontos de controle (PC1 ao PC10) e, a Figura 5, com os pontos de verificação (PV1 ao PV11). Na distribuição dos pontos, buscou-se cobrir o volume total do local levantado e posicionar os alvos em locais sem obstrução, uma vez que ambos influenciam significativamente a precisão no pós-processamento (SCHULZ, 2007).

Figura 4 – Esquema em planta da distribuição espacial dos pontos de controle



Fonte: os autores.

Figura 5 – Esquema em planta da distribuição espacial dos pontos de verificação



Fonte: os autores.

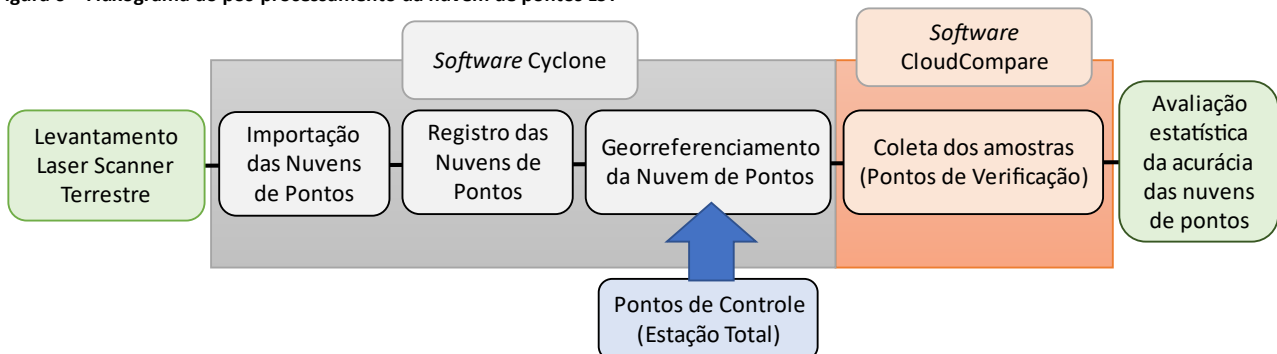
Conforme ilustrado nas figuras acima, os pontos foram distribuídos em toda a área de levantamento. Os pontos de verificação foram distribuídos com diferentes distâncias em relação às posições de varredura do LST.

Pós-processamento da nuvem de pontos

Neste trabalho, considerou-se pós-processamento todas as etapas em que os dados são manipulados e tratados por meio de técnicas automáticas ou manuais, como decorrente na atividade de registro. A Figura 6 apresentada o fluxo de trabalho realizado entre a aquisição das nuvens de pontos e a avaliação da qualidade posicional. Foram efetuadas varreduras com LST em dois modos de configuração, o primeiro com alta densidade

(Levantamento 1) e o segundo com baixa densidade (Levantamento 2). Logo, as etapas desenvolvidas e apresentadas a seguir foram executadas igualmente para os dois conjuntos de dados

Figura 6 – Fluxograma do pós-processamento da nuvem de pontos LST



Fonte: os autores.

O conjunto de nuvens de pontos, respectivo a cada levantamento, foi importado no *software Cyclone*. Posteriormente, realizou-se o registro das nuvens de cada posição de varredura LST (Posição 1, Posição 2 e Posição 3). A união das nuvens se deu pela compatibilidade de feições e ajuste manual pelo operador, bem como a otimização do registro pelo *software*.

O georreferenciamento pode ser realizado pontualmente através de alvos, ou por primitivas geométricas, como os planos, cilindros ou esferas (VOSELMAN; MAAS, 2010). Neste trabalho, executou-se o georreferenciamento por meio de pontos de controle levantados pela estação total. Tais pontos foram importados e assinalados nos respectivos alvos amostrados nas nuvens pós-registradas, resultando no georreferenciamento da nuvem de pontos.

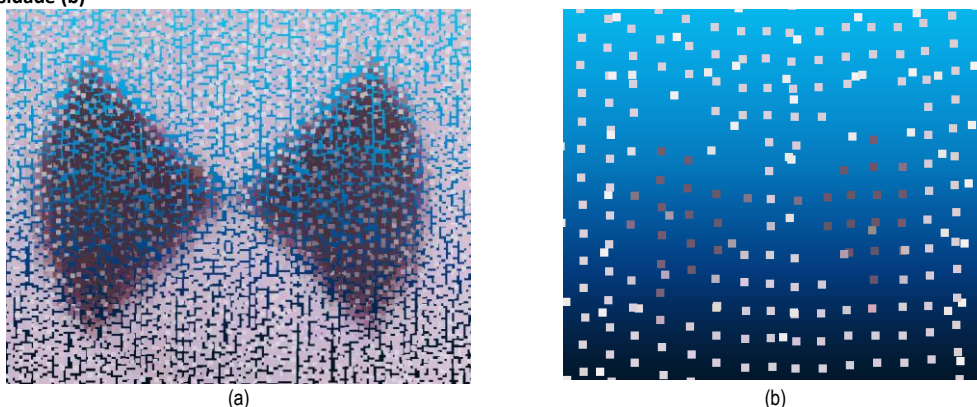
O *Cyclone* possibilita ainda a exportação das nuvens em outros formatos, compatíveis com outras plataformas de processamento de nuvem de pontos. Assim, os dados foram exportados no formato *.PTS para serem trabalhados no *software* livre *CloudCompare*.

Determinação da qualidade posicional

Para a avaliação da qualidade posicional 2D e 3D, alcançável com as varreduras *laser* terrestre, distribuíram-se os pontos de verificação mencionados anteriormente, conforme a Figura 5. Tais pontos foram mensurados e suas respectivas coordenadas tridimensionais determinadas por irradiação com a estação total TS15, no mesmo sistema local dos pontos de controle.

Assim, a avaliação visou comparar as coordenadas dos alvos obtidas nas nuvens de pontos com as coordenadas precisas, levantadas com a estação total. Entretanto, conforme apresentado na Figura 7, coletar as coordenadas no centro do alvo, direto na nuvem de pontos, acarreta em imprecisões, uma vez que a varredura com LST fornece pontos distribuídos sobre a superfície levantada, ou seja, torna-se improvável que um destes pontos coincida exatamente com o centro geométrico do alvo. A condição para leitura das coordenadas do centro pode ser prejudicada conforme explicitado também pela Figura 7, onde o alvo referente ao ponto PV1 apresenta maior densidade para o levantamento 1 (Figura 7a), ou seja, mais pontos obtidos pelo LST quando comparado ao levantamento 2 (Figura 7b), realizado no modo baixa densidade do equipamento.

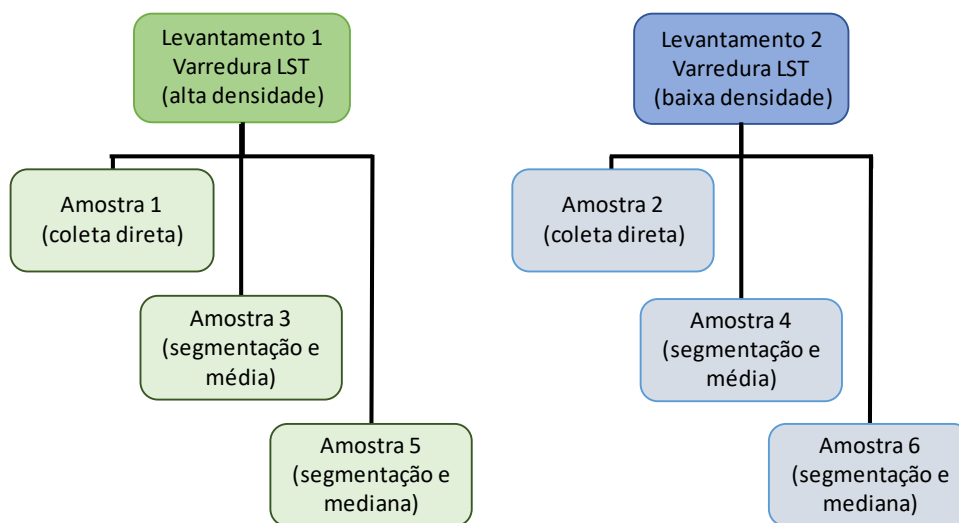
Figura 7 – Parcela da nuvem de pontos levantada sobre o ponto de controle PV1 com alta densidade (a) e baixa densidade (b)



Fonte: os autores.

Para seguir a avaliação, duas estratégias foram adotadas para coleta no *CloudCompare* das coordenadas em cada levantamento. A Figura 8 esquematiza as diferentes amostragens realizadas. A amostra 1 e 2 representam as coordenadas dos pontos mais próximos ao centro geométrico dos alvos para os levantamentos 1 e 2, respectivamente (Figura 9). A segunda estratégia consistiu na estimação das coordenadas segmentando-se todos os pontos contidos no alvo e calculando-se as médias, formando-se as amostras 3 e 4 (Figura 10). As amostras 5 e 6 na terceira estratégia foram similares à segunda estratégia, porém com o centro determinado a partir da mediana dos dados segmentados.

Figura 8 – Elaboração as amostras elaboradas para avaliação da qualidade posicional



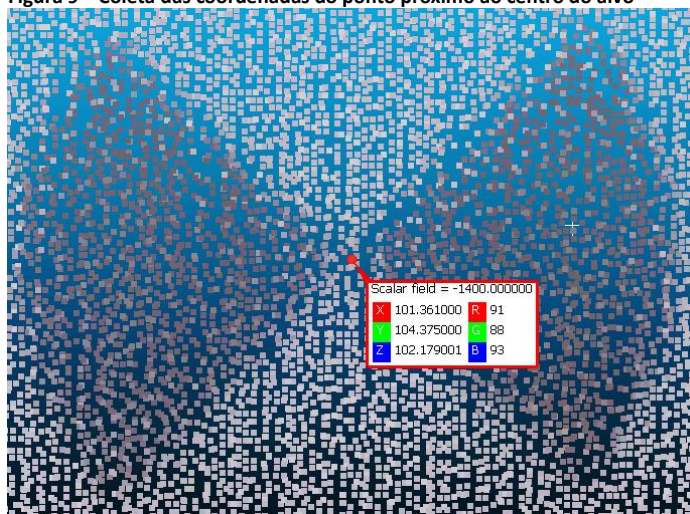
Fonte: os autores.

Testes estatísticos

Os testes seguiram os procedimentos convencionais de teste de hipóteses, sendo utilizada a metodologia apresentada em Merchant (1982). Foram realizados usando as discrepâncias, os dados do laser *scanner* e os pontos de controle correspondentes, determinados a partir do levantamento topográfico, empregando-se irradiação 3D com estação total. Assim, foram avaliadas a existência ou não de erros sistemáticos (tendência) a partir do teste *t Student*, uma vez que a amostra avaliada é menor do que 30 pontos. Posteriormente, a precisão dos pontos foi analisada por meio do teste Qui-Quadrado.

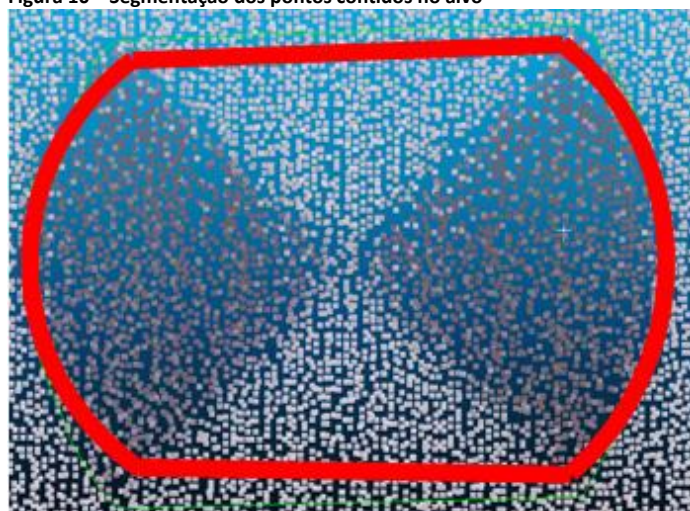
Neste trabalho, avaliaram-se as discrepâncias planimétricas ou 2D (resultante das coordenadas X e Y) e as discrepâncias 3D. Todos os testes foram bilaterais, baseados em um nível de confiança de 95%.

Figura 9 – Coleta das coordenadas do ponto próximo ao centro do alvo



Fonte: os autores.

Figura 10 – Segmentação dos pontos contidos no alvo



Fonte: os autores.

Teste t Student

Considera-se que a amostra está livre de tendências quando a média das discrepâncias (μ_{Δ_x}) podem ser consideradas iguais a zero. Sendo assim, as hipóteses a serem avaliadas, segundo Galo e Camargo (1994) e Silva e Schuler (2015), são apresentadas nas Equações 1 e 2.

$$H_0: \mu_{\Delta_x} = 0 \quad \text{Eq. 1}$$

$$H_1: \mu_{\Delta_x} \neq 0 \quad \text{Eq. 2}$$

A média das discrepâncias 2D e 3D, entre as grandezas obtidas a partir do Laser e as dos pontos de controle, podem ser estimadas conforme as Equações 3, 4 e 5 (MERCHANT 1982).

$$\Delta X_i = X_i^L - X_i^C, \Delta Y_i = Y_i^L - Y_i^C, \Delta Z_i = Z_i^L - Z_i^C \quad \text{Eq. 3}$$

$$\Delta 2D_i = \sqrt{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2}, \Delta 3D_i = \sqrt{\Delta 2D_i^2 + \Delta Z_i^2} \quad \text{Eq. 4}$$

$$\mu_{\Delta 2D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta 2D_i, \mu_{\Delta 3D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta 3D_i \quad \text{Eq. 5}$$

onde X_i^C, Y_i^C e Z_i^C são as coordenadas X, Y e Z dos pontos de controle e X_i^L, Y_i^L e Z_i^L são as coordenadas X, Y e Z obtidas através do *Laser Scanner*; $\Delta 2D_i$ e $\Delta 3D_i$ são as resultantes 2D e 3D das discrepâncias, respectivamente; $\mu_{\Delta 2D}$ e $\mu_{\Delta 3D}$ são as médias das discrepâncias 2D e 3D, respectivamente.

Os desvios-padrão das amostras de discrepâncias dos pontos testados (S_X) é calculada pelas Equações 6 e 7 (MERCHANT, 1982).

$$S_{2D} = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta 2D_i - \mu_{\Delta 2D})^2 \right]^{1/2} \quad \text{Eq. 6}$$

$$S_{3D} = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta 3D_i - \mu_{\Delta 3D})^2 \right]^{1/2} \quad \text{Eq. 7}$$

Admitindo-se a normalidade da amostra, o teste para a verificação da existência de tendências, para o nível de significância de 5% é feito comparando-se a estatística teórica tabelada ($t_{n-1, \alpha/2}$) com a estatística calculada (MERCHANT, 1982), conforme a o valor t dado pela Equações 8 e 9.

$$t_{2D} = \frac{1}{S_{2D}} (\mu_{\Delta 2D}) \sqrt{n}, \quad t_{3D} = \frac{1}{S_{3D}} (\mu_{\Delta 3D}) \sqrt{n} \quad \text{Eq. 8}$$

Se $|t_{2D}| \leq t_{n-1, \alpha/2}$ ou $|t_{3D}| \leq t_{n-1, \alpha/2}$, logo aceita-se a hipótese nula, sendo as discrepâncias determinadas consideradas estatisticamente iguais a zero e isentas de tendência.

Teste Qui-Quadrado

Aplica-se o teste Qui-Quadrado para a avaliação das precisões de coordenadas, de acordo com os valores de tolerância estipulados pelo avaliador (SANTOS, 2010). Para Galo e Camargo (1994), esta análise pode ser feita pela comparação entre o desvio-padrão das discrepâncias encontradas (σ_{2D} e σ_{3D}) e o erro-padrão esperado. Neste trabalho o erro-padrão definido corresponde ao desvio-padrão nominal do equipamento (σ_n). Assim, as hipóteses de teste foram elaboradas conforme o explicitado pelas Equações 9 e 10, onde as amostras foram consideradas precisas se as variâncias das discrepâncias (σ_{2D}^2 e σ_{3D}^2) fossem estatisticamente iguais à tolerância estabelecida (σ_n^2).

$$\begin{cases} H_0: \sigma_{2D}^2 = \sigma_n^2 \\ H_1: \sigma_{2D}^2 > \sigma_n^2 \end{cases} \quad \text{Eq. 9}$$

$$\begin{cases} H_0: \sigma_{3D}^2 = \sigma_n^2 \\ H_1: \sigma_{3D}^2 > \sigma_n^2 \end{cases} \quad \text{Eq. 10}$$

O teste de precisão para os dados levantados é feito comparando-se a estatística teórica ($\chi^2_{n-1, \alpha}$) com a estatística da amostra (Equação 11 e 12).

$$\chi^2_{2D} = \left(\frac{n-1}{\sigma_n^2} \right) \sigma_{2D}^2 \quad \text{Eq. 11}$$

$$\chi^2_{3D} = \left(\frac{n-1}{\sigma_n^2} \right) \sigma_{3D}^2 \quad \text{Eq. 12}$$

Merchant (1982) buscou analisar a precisão da componente 2D por meio das coordenadas X e Y. Adaptando-se à abordagem de Merchant (1982), neste trabalho a investigação visou também a componente 3D, adicionando-se a coordenada Z na avaliação. Assim, se as relações $\chi^2_{2D} \leq \chi^2_{n-1,\alpha}$ ou $\chi^2_{3D} \leq \chi^2_{n-1,\alpha}$ fossem atendidas, as amostras testadas obedeceriam ao padrão especificado de precisão, ou seja, aceita-se a hipótese nula a um nível de significância de 5%.

Resultados e discussão

As varreduras *laser* resultaram em seis nuvens primárias, três referentes ao levantamento 1 com alta densidade, totalizando 210 milhões de pontos, e outras três para o levantamento 2 com baixa densidade, contendo 80 milhões de pontos com coordenadas tridimensionais.

Os registros manuais entre as nuvens de pontos foram realizados no *Cyclone*. No levantamento 1, a sobreposição média entre as nuvens foi de 65%, com erro médio de 0,005 m. Para o levantamento 2, a sobreposição média foi de 50% e o erro médio de 0,006 m. Ainda na mesma plataforma, efetuou-se o georreferenciamento das nuvens por meio da detecção visual dos 10 alvos (pontos de controle). Para os levantamentos 1 e 2 os erros médios resultantes foram de 0,002 m e 0,005 m, respectivamente. Diante destes resultados prévios, observou-se que o modo de levantamento, ou seja, a densidade das nuvens de pontos definida para o levantamento, impacta nos resultados das atividades de pós-processamento.

Após o registro e o georreferenciamento, as nuvens foram exportadas em formato *.PTS. Em seguida, cada levantamento foi importado no *software CloudCompare*, onde foram realizadas as segmentações dos alvos e as leituras, a fim de serem determinadas as coordenadas respectivas aos centros, comparando-as aos valores mensurados dos pontos de verificação coletados com a estação total.

Nas Tabelas 2 e 3 são apresentadas as discrepâncias encontradas nas Amostras 1 e 2 dos levantamentos 1 e 2, respectivamente. Estas discrepâncias estão relacionadas às diferenças entre as leituras diretas (do ponto mais próximo) dos centros dos alvos na nuvem de pontos e os valores dos pontos de verificação, mensurados pela estação total. Nas Tabelas 4 e 5 são indicados os resultados das comparações entre coordenadas referentes às médias dos pontos contidos nos alvos (Amostras 3 e 4). Por fim, nas Tabelas 6 e 7 são demonstradas as discrepâncias determinadas pelas medianas das amostras contidas nos alvos (Amostras 5 e 6).

Conforme observado nas discrepâncias acima, as amostras referentes ao levantamento 1 apresentaram valores de discrepância inferiores em relação ao levantamento 2. Isso indica que a maior densidade relacionada ao modo de levantamento 1, possibilitou um produto final com melhor qualidade posicional, de acordo com as amostras escolhidas, comparando às coordenadas homólogas mensuradas por um instrumento de melhor precisão nominal.

Tabela 2 – Amostra 1 - Cálculo das discrepâncias nos pontos de verificação por leitura direta (Levantamento 1)

Pontos de Verificação	Discrepâncias 2D (m)	Discrepâncias 3D (m)
1	0,0025	0,0026
2	0,0042	0,0054
3	0,0042	0,0047
4	0,0076	0,0079
5	0,0047	0,0048
6	0,0065	0,0065
7	0,0044	0,0044
8	0,0011	0,0018
9	0,0031	0,0031
10	0,0021	0,0026
11	0,0014	0,0014

Fonte: os autores.

Tabela 3 – Amostra 2 - Cálculo das discrepâncias nos pontos de verificação por leitura direta (Levantamento 2)

Pontos de Verificação	Discrepâncias 2D (m)	Discrepâncias 3D (m)
1	0,0075	0,0077
2	0,0034	0,0034
3	0,0082	0,0087
4	0,0055	0,0142
5	0,0054	0,0058
6	0,0048	0,0067
7	0,0142	0,0155
8	0,0108	0,0259
9	0,0035	0,0181
10	0,0081	0,0126
11	0,0072	0,0079

Fonte: os autores.

Tabela 4 – Amostra 3 - Cálculo das discrepâncias nos pontos de verificação pela média dos pontos nos alvos (Levantamento 1)

Pontos de Verificação	Discrepâncias 2D (m)	Discrepâncias 3D (m)
1	0,0025	0,0031
2	0,0050	0,0070
3	0,0048	0,0048
4	0,0032	0,0034
5	0,0047	0,0050
6	0,0045	0,0048
7	0,0023	0,0028
8	0,0014	0,0015
9	0,0028	0,0037
10	0,0016	0,0021
11	0,0033	0,0040

Fonte: os autores.

Tabela 5 – Amostra 4 - Cálculo das discrepâncias nos pontos de verificação pela média dos pontos nos alvos (Levantamento 2)

Pontos de Verificação	Discrepâncias 2D (m)	Discrepâncias 3D (m)
1	0,0043	0,0046
2	0,0046	0,0046
3	0,0049	0,0133
4	0,0040	0,0113
5	0,0031	0,0111
6	0,0015	0,0015
7	0,0030	0,0142
8	0,0013	0,0022
9	0,0030	0,0058
10	0,0032	0,0125
11	0,0061	0,0113

Fonte: os autores.

Tabela 6 – Amostra 5 - Cálculo das discrepâncias nos pontos de verificação pela mediana dos pontos nos alvos (Levantamento 1)

Pontos de Verificação	Discrepâncias 2D (m)	Discrepâncias 3D (m)
1	0,0026	0,0030
2	0,0061	0,0088
3	0,0051	0,0054
4	0,0036	0,0038
5	0,0053	0,0057
6	0,0043	0,0046
7	0,0041	0,0043
8	0,0022	0,0023
9	0,0045	0,0051
10	0,0027	0,0030
11	0,0016	0,0021

Fonte: os autores.

Tabela 7 – Amostra 6 - Cálculo das discrepâncias nos pontos de verificação pela mediana dos pontos nos alvos (Levantamento 2)

Pontos de Verificação	Discrepâncias 2D (m)	Discrepâncias 3D (m)
1	0,0067	0,0133
2	0,0065	0,0066
3	0,0033	0,0222
4	0,0042	0,0118
5	0,0039	0,0113
6	0,0033	0,0033
7	0,0037	0,0090
8	0,0081	0,0083
9	0,0040	0,0055
10	0,0040	0,0093
11	0,0066	0,0099

Fonte: os autores.

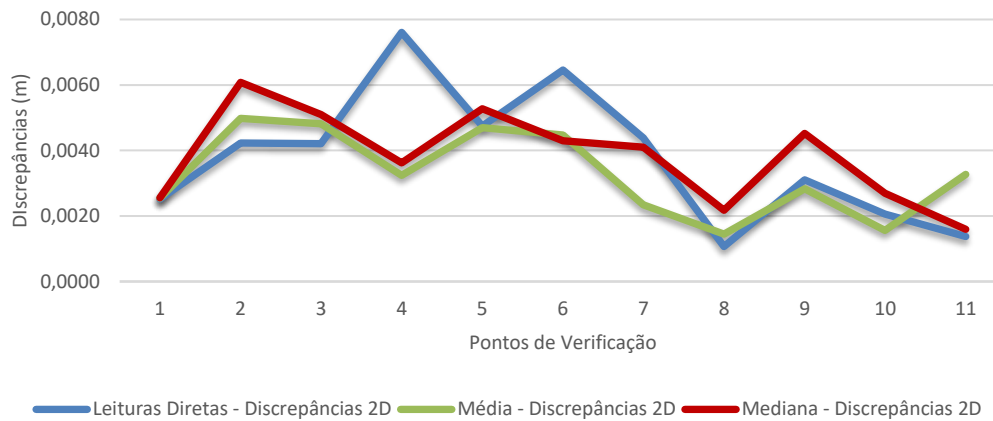
Para o levantamento 1, a maior discrepância para as avaliações 2D e 3D foram de 0,0076 m para leitura direta das coordenadas e 0,0088 m na estimativa das coordenadas por mediana, respectivamente. O levantamento 2 apresentou o valor de 0,0142 m para discrepância 2D e 0,0259 m no caso 3D, ambas nas análises de leituras diretas.

Sendo as discrepâncias para o levantamento 1 menores que 1 cm (entre 0,11 cm e 0,76 cm para o caso 2D ou 0,14 cm e 0,88 cm para o caso 3D), atenderiam ao valor estabelecido pelo Conselho Internacional de Monumentos e Sítios (*International Council on Munuments and Sites - ICOMOS*) para os levantamentos rápidos e precisos. No caso dos levantamentos precisos, a escala de levantamento é de 1:50, sendo de 1 a 2 cm o intervalo de erro máximo permitido no posicionamento dos pontos, em consonância com o preconizado pelo ICOMOS.

Todavia, o levantamento 2 apresentou discrepância máxima de 1,42 cm para a avaliação 2D e de 2,59 cm para 3D, que seriam quase imperceptíveis nas escalas arquitetônicas de 1:100 e 1:50, onde o erro de grafismo estaria no intervalo de 1 a 3 cm (DOCCI; MAESTRI, 2008).

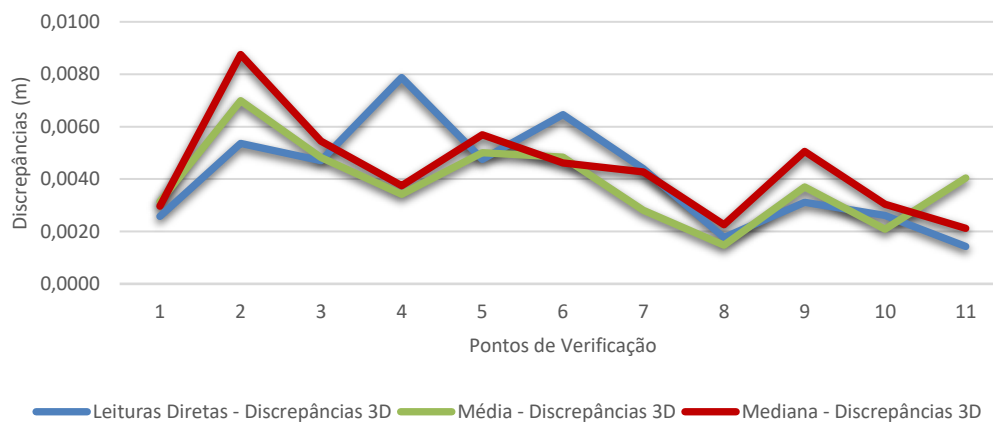
Para avaliar o comportamento das discrepâncias, de acordo com as abordagens adotadas para a determinação das coordenadas dos centros dos alvos, os gráficos nas Figuras 11 e 12 indicam os valores referentes ao levantamento 1 para os valores 2D e 3D. As Figuras 13 e 14 apresentam as discrepâncias 2D e 3D, respectivamente, referentes ao levantamento 2.

Figura 11 – Gráfico das discrepâncias 2D para a nuvem com alta densidade (levantamento 1)



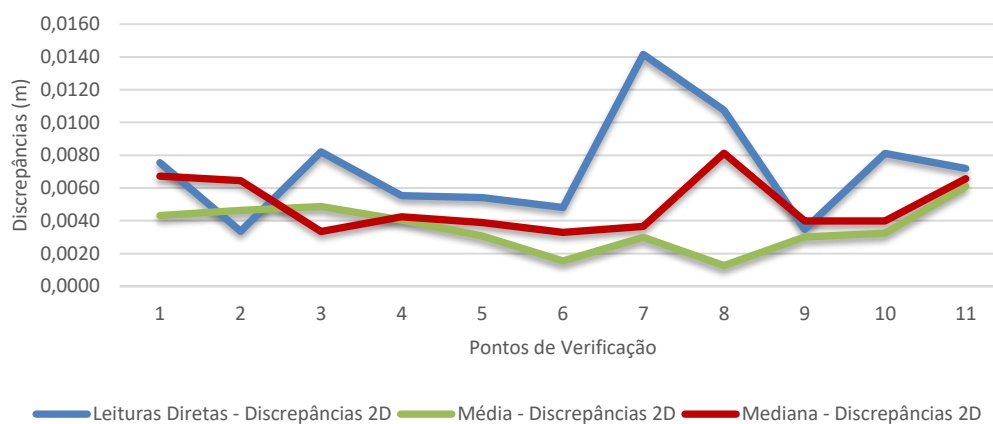
Fonte: os autores.

Figura 12 – Gráfico das discrepâncias 3D para a nuvem com alta densidade (levantamento 1)



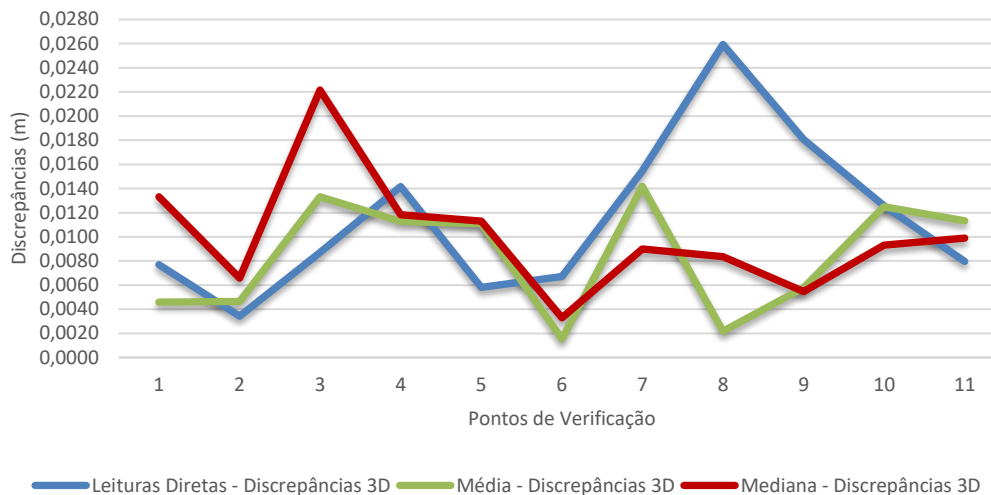
Fonte: os autores.

Figura 13 – Gráfico das discrepâncias 2D para a nuvem com baixa densidade (levantamento 2)



Fonte: os autores.

Figura 14 – Gráfico das discrepâncias 3D para a nuvem com baixa densidade (levantamento 2)



Fonte: os autores.

Conforme as figuras anteriores, observaram-se discrepâncias maiores nos gráficos referentes aos valores 3D, o que era esperado, uma vez que a resultante 3D é a soma vetorial da discrepância 2D mais a discrepância relacionada ao componente vertical. Entretanto, estas grandezas foram maiores para o levantamento 2, evidenciando que o modo de varredura, em baixa densidade, pode influenciar na degradação da qualidade posicional em relação às coordenadas verticais das nuvens de pontos.

Em relação aos procedimentos para a determinação das coordenadas, as leituras diretas, estimativas por médias e estimativas por medianas apresentaram valores próximos entre si para diversos pontos. Contudo, constatou-se que as leituras diretas apresentaram discrepâncias maiores em alguns pontos, como indicado na Figura 13 com 9 pontos, e Figura 14 com 6 pontos, ambos para o levantamento 2. Além disso, a determinação das coordenadas pela média apresentou menores discrepâncias na maioria dos pontos.

Em seguida, os testes estatísticos *t Student* e Qui-quadrado foram aplicados às amostras acima para análise de tendências e precisões. Na Tabela 8 são apresentadas as médias, desvios-padrão e as estatísticas utilizadas para testar as hipóteses elaboradas. O valor tabelado para a estatística de teste com 10 graus de liberdade e nível de significância de 5% foram de 2,2281 para $t_{n-1, \alpha/2}$ e de 18,307 para $\chi^2_{n-1, \alpha}$.

Conforme a Tabela 8, todas as estatísticas calculadas para a avaliação de tendência apresentaram valores superiores ao limite estabelecido pela estatística tabelada. Sendo assim, a hipótese nula de não tendenciosidade das amostras foi rejeitada a um nível de significância 5% e 10 graus de liberdade.

A tendência detectada nas amostras testadas aponta para a possível existência de erros sistemáticos nos levantamentos realizados. Tais erros podem ter como origem tanto os parâmetros ambientais, o método do levantamento ou imperfeições instrumentais. Considerando o panorama de realização dos levantamentos, os resultados apreciados apontam para a existência de erros de fontes instrumentais. Neste caso, reforça-se a necessidade da execução dos processos de verificação e calibração do LST, visando detecção e eliminação dos erros sistemáticos. Outra opção para o caso de dados já levantados seria a modelagem e consecutiva correção dos erros sistemáticos nas amostras.

Tabela 8 – Resultados dos parâmetros dos testes estatísticos aplicados às amostras de verificação

Amostras	Parâmetros Estatísticos	2D	Tendencioso	Preciso	3D	Tendencioso	Preciso
Amostra 1	μ_A (m)	0,0038			0,0041		
	S_A (m)	0,0020	SIM	SIM	0,0020	SIM	SIM
	$t_{n-1,\alpha/2}$	6,1717			6,7539		
	$\chi_{n-1,\alpha}^2$	1,6643			1,6160		
μ_A (m)	0,0071	0,0115					
Amostra 2	S_A (m)	0,0032	SIM	SIM	0,0066	SIM	SIM
	$t_{n-1,\alpha/2}$	7,3666			5,8094		
	$\chi_{n-1,\alpha}^2$	0,2582			1,0770		
	μ_A (m)	0,0033			0,0038		
Amostra 3	S_A (m)	0,0013	SIM	SIM	0,0015	SIM	SIM
	$t_{n-1,\alpha/2}$	8,4714			8,2871		
	$\chi_{n-1,\alpha}^2$	0,6643			0,9481		
	μ_A (m)	0,0035			0,0084		
Amostra 4	S_A (m)	0,0014	SIM	SIM	0,0047	SIM	SIM
	$t_{n-1,\alpha/2}$	8,2168			5,9477		
	$\chi_{n-1,\alpha}^2$	0,0513			0,5486		
	μ_A (m)	0,0038			0,0044		
Amostra 5	S_A (m)	0,0014	SIM	SIM	0,0019	SIM	SIM
	$t_{n-1,\alpha/2}$	8,9126			7,5898		
	$\chi_{n-1,\alpha}^2$	0,8087			1,4519		
	μ_A (m)	0,0049			0,0100		
Amostra 6	S_A (m)	0,0017	SIM	SIM	0,0050	SIM	SIM
	$t_{n-1,\alpha/2}$	9,6645			6,7221		
	$\chi_{n-1,\alpha}^2$	0,0716			0,6136		

Fonte: os autores.

De acordo com a Tabela 8, todos os valores calculados para $\chi_{n-1,\alpha}^2$ foram inferiores à estatística tabelada. Desta forma, os pontos coletados nas nuvens podem ser considerados estatisticamente precisos, ou seja, as coordenadas determinadas para os centros dos alvos apresentaram dispersões dentro do limite esperado, estabelecido pela precisão nominal do equipamento, independente da técnica de estimação da posição central do alvo pela nuvem de pontos.

Portanto, no panorama observado, cabe ressaltar que os dados adquiridos por varreduras com LST, assim como em outros métodos de levantamentos topográficos e geodésicos, os produtos derivados de tais práticas possuem erros inevitavelmente. Este fato é reforçado por Gemael, Machado e Wandresen (2015), que definem estes erros como propriedades dos dados. Entretanto, destaca-se que a tolerância dos erros pode ser delimitada mutuamente com a finalidade do produto, ou seja, o produto elaborado em um levantamento será aceitável ou não conforme a qualidade posicional esperada para as atividades-fim.

Conclusão

A avaliação dos produtos derivado da varredura *laser* terrestre demonstrou resultados satisfatórios ao se considerar as precisões nominais indicadas. Trabalhando-se à curtas distâncias, os resultados quanto às precisões das amostras testadas apresentaram valor máximo de 2 mm para o levantamento de nuvens de pontos em alta densidade, e de 6,6

mm para baixa densidade, indicando que os produtos obtidos atenderam às precisões nominais do LST BLK360, determinadas pelo fabricante em 5 mm para o primeiro caso, e 20 mm para o segundo caso.

Considerando a incerteza na extração das coordenadas extraídas dos alvos diretamente nas nuvens de pontos, observou-se que a estratégia do ajustamento dos dados contidos, para definir o ponto central, se apresentou como uma alternativa viável quanto à qualidade posicional. Neste quesito, destacou-se a proposta de obtenção das coordenadas dos centros dos alvos pela média, que forneceu discrepâncias 3D máximas de 7,0 mm para a nuvem de pontos com alta densidade, e 14,2 mm para a nuvem em baixa densidade. Tais valores são menores que os obtidos nas demais abordagens, sendo de 7,9 mm para leitura direta e 8,8 mm para mediana no primeiro levantamento, e 25,9 mm para leitura direta e 22,2 mm para mediana no segundo levantamento.

De acordo com o avaliado, ainda que a varredura com LST estivesse configurada no modo alta densidade e, com isso, a amostragem de pontos sobre o alvo favorecesse a determinação das coordenadas do centro, por um ponto direto da nuvem, ainda assim a qualidade posicional dos dados testados aumentaria ao se realizar o ajustamento do conjunto de pontos contido no alvo, para a determinação do ponto central (média e mediana).

Estes resultados fomentam a viabilidade da utilização do equipamento testado tanto para levantamento topográficos, quanto para trabalhos arquitetônicos, como reconstruções bidimensionais ou tridimensionais de prédios históricos, entre outras atividades em que se faz necessária a aquisição de dados com alta qualidade posicional, dentro da precisão obtida. A metodologia utilizada também se mostrou adequada para os propósitos estabelecidos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo 141133/2020-1) pelo fornecimento de bolsa junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná.

Referências

ARYAN, A.; BOSCHÉ, F.; TANG, P. Planning for terrestrial laser scanning in construction: a review. **Automation in Construction**, v. 125, p. 103551, May 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103551>.

BORGES, P. A. F.; FONSECA JUNIOR, E. S.; CINTRA, J. P.; TAVARES JUNIOR, J. B. Avaliação da precisão posicional de um Sistema Laser Scanner Terrestre AM-CW a partir de uma placa de esferas 3D. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 70, n. 3. p. 906-931, jul./ set. 2018. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv70n3-45706>

CANUTO, C. L.; MOURA, L. R.; SALGADO, M. S. Tecnologias digitais e preservação do patrimônio arquitetônico: explorando alternativas. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 7, n. 4, p. 252-264, 31 dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v7i4.8647456>.

CANUTO, C. L.; SALGADO, M. S. Modelo BIM do Palácio Gustavo Capanema 1937-1945. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 15, n. 1, p. 101-116, 17 jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.11606/gtp.v15i1.152823>.

CHECCUCCI, E. S. Teses e dissertações brasileiras sobre BIM: uma análise do período de 2013 a 2018. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 10, p. 1-17, 26 fev. 2019. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8653708>.

CINTRA, J. P.; GONÇALVES, R. Aplicações das tecnologias Laser Scan e aerofotogrametria por drone para museus. **Anais do Museu Paulista**, São Paulo, v. 27, p. 1-28. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1982-02672019v27e25d1>.

COGIMA, C. K.; NASCIMENTO, R. V.C.; PAIVA, P. V.V.; CARVALHO, M. A.G.; DEZEN-KEMPTER, E. Scan-to-HBIM aplicado à igreja da Pampulha de Oscar Niemeyer. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 15, n. 1, p. 117-134, 17 jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.11606/gtp.v15i1.152828>.

DINIS, F. M.; SANHUDO, L.; MARTINS, J. P.; RAMOS, N. M. M. Improving project communication in the architecture, engineering and construction industry: coupling virtual reality and laser scanning. **Journal of Building Engineering**, v. 30, July. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101287>.

DOCCI, M.; MAESTRI, D. **Manuale di Rivelamento architettonico e Urbano**. 10. ed. Bari: Giuseppe Laterza, 2008. 364 p.

FAGGION, P. L. **Obtenção dos elementos de calibração e certificação de medidores eletrônicos de distância em campo e laboratório**. 2001. 134 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

FUENTES SANTIBAÑEZ, S. A. **Avaliação da influência do modelo de ajustamento de observações e da densidade de pontos laser scanner terrestre para a representação paramétrica de superfícies planas**. 2010, 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/25575/Dissert.%20Sebastian_.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 20 jan. 2020.

GALO, M.; CAMARGO, P. O. Utilização do GPS no controle de qualidade de carta. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO - COBRAC, 1., Florianópolis, 1994. **Anais [...]**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.

GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. 2. ed. Curitiba: Ed. UFPR. 2015. 428 p. (Série Pesquisa, n. 281).

GROSSKOPF, G. G.; HERDEN, Y. S.; SILVA, R. F. T.; MARCHIORI, F. F. A fotografia 360 graus como ferramenta de suporte à modelagem de *as built*. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 10, p. e019021, 28 maio 2019. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8653839>.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)**. Duque de Caxias, 2012. 94 p. Disponível em: https://metrologia.org.br/wpsite/wp-content/uploads/2021/02/vim_2012.pdf. Acesso em: 20 jan. 2020.

JAAFAR, H. A.; MENG, X.; SOWTER, A. Terrestrial laser scanner error quantification for the purpose of monitoring. **Survey Review**, v. 50, n. 360, p. 232-248, 7 Mar. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00396265.2016.1259721>.

LEICA GEOSYSTEMS (Brasil). **Captura de realidade na construção e engenharia**. Curitiba: Leica Geosystems, 2020. Disponível em: https://leica-geosystems.com/pt-br/about-us/content-features/reality-capture-for-construction-and-engineering?&utm_medium=marketingemail&utm_source=google&utm_campaign=&utm_content=Email2. Acesso em: 20 maio 2020.

LEICA GEOSYSTEMS. **Leica BLK360: Manual do Usuário**. 2. ed. Curitiba: Leica Geosystems, 2018.

LEICA GEOSYSTEMS. **Leica TS15 user manual**. Heerbrugg: Leica Geosystems, 2015.

MERCHANT, D. C. Spatial accuracy standards for large scale line maps. In: AMERICAN CONGRESS ON SURVEYING AND MAPPING, 42., 1982, Falls Church. **Proceedings [...]**. Gaithersburg: ACSM, 1982. v. 1, p. 222-231.

SANTOS, A. P. **Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais com o uso da estatística espacial**. 2010, 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Viçosa, Viçosa, 2010. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/3733/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2020.

SCHULZ, T. **Calibration of a terrestrial laser scanner for engineering geodesy**. 2007. 172 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Technical University of Berlin, Berlim, 2007. DOI: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005368245>.

SHAN, J.; TOTH, C. K. (ed.). **Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing**. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2018. 654 p.

SILVA, M. V.; SCHULER, C. A. B. Avaliação de dados planimétricos LIDAR para áreas urbanas: Recife/PE. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 67, n. 6, p. 1103-1117, set./out. 2015. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44631/23647>. Acesso em: 20 jan. 2020.

STAIGER, Rudolf. The geometrical quality of terrestrial laser scanner (TLS). In: FIG WORKING WEEK, 8., 2005, Cairo. **Proceedings [...]**. 2005. Reston: Global Spatial Data Infrastructure, 2005.

VOSSelman, G.; MAAS, H. **Airborne and Terrestrial Laser Scanning**. Dunbeath: Whittles Publishing, 2010. 337 p.

WALTON, Gabriel; DELALOYE, Danielle; DIEDERICH, Mark S. Development of an elliptical fitting algorithm to improve change detection capabilities with applications for deformation monitoring in circular tunnels and shafts. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 43, p.336-349, July. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2014.05.014>.

WUTKE, J. D. **Métodos para avaliação de um Sistema Laser Scanner Terrestre**. 2006. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/5958/disserta%C3%A7%C3%A3o_JulianaWutke.pdf?sequence=1. Acesso em: 20 jan. 2020.

WUTKE, J. D.; CENTENO, J. A. S. Métodos para avaliação da resolução de sistemas de varredura a laser terrestres. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 13, n. 1, p.151-164, jan./jun. 2007.

1 Samir de Souza Oliveira Alves

Engenheiro Agrimensor e Cartógrafo. Mestre em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná. Doutorando em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná. Endereço postal: Departamento de Geomática, Centro Politécnico, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná – Brasil, CEP 81531-990

2 Luís Augusto Koenig Veiga

Engenheiro Cartógrafo pela Universidade Federal do Paraná. Doutor em Engenharia de Transportes pela Universidade de São Paulo. Professor Titular da Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Departamento de Geomática. Endereço postal: Departamento de Geomática, Centro Politécnico, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná – Brasil, CEP 81531-990

3 Alex Soria Medina

Engenheiro Cartógrafo pela Universidade Federal de Pernambuco. Doutorado em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná. Professor Titular da Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Departamento de Geomática. Endereço postal: Departamento de Geomática, Centro Politécnico, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná – Brasil, CEP 81531-990