

A AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA ALTIMÉTRICA DOS DADOS LIDAR UTILIZANDO A METODOLOGIA DO PROGRAMA NACIONAL DE ELEVAÇÃO DIGITAL DOS ESTADOS UNIDOS

F. R. Ferreira^{1,3}, J. P. Cintra^{1,2}

¹Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil

²Museu Paulista da Universidade de São Paulo, Brasil

³Serviço Geológico do Brasil, Brasil

Comissão IV - Sensoriamento Remoto, Fotogrametria e Interpretação de Imagens

RESUMO

O LiDAR aerotransportado está se firmando como tecnologia de aquisição de dados para a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE), modelos digitais 3D de cidades, gestão dos recursos naturais, gestão de desastres naturais, modelagem hidrológica, monitoramento do carbono florestal e outras aplicações. Com as informações das coordenadas de cada pulso laser refletido e da classificação de cada sinal de retorno, obtidas graças ao uso do Sistema de Posicionamento Global por Satélites e do Sistema de Navegação Inercial durante a varredura, tornou-se possível avaliar a acurácia posicional e altimétrica de cada ponto LiDAR. Esse trabalho apresenta uma avaliação da acurácia altimétrica dos dados LiDAR, obtidos por varredura aerotransportada numa região do município de Campinas, São Paulo, empregando a metodologia do Programa Nacional de Elevação Digital dos Estados Unidos, que pode ajudar a definir uma norma brasileira, hoje inexistente.

Palavras-chave: LiDAR, Acurácia, Altimetria.

ABSTRACT

Airborne LiDAR has been established as a mainstream option for data acquisition to generate Digital Elevation Models (MDE), 3D digital models of cities, natural resource management, natural disaster management, hydrological modeling, forest carbon monitoring and other applications. With coordinate information of each reflected pulse obtained by using the Global Positioning System Satellites and the Inertial Navigation System during scanning, it was possible to evaluate the positional and altimetric accuracy of each LiDAR point. This study presents an evaluation of the vertical accuracy of LiDAR points, obtained by airborne scanning in a region of Campinas, São Paulo, utilizing the methodology of the National Digital Elevation Program of the United States, that can help to define a Brazilian guideline, non-existent today.

Keywords: LiDAR, Accuracy, Altimetry.

1- INTRODUÇÃO

O LiDAR (acrônimo de *Light Detection And Ranging*) é um sensor remoto ativo que pode ser empregado a partir de plataformas aéreas e terrestres.

O princípio do funcionamento do LiDAR baseia-se na medição de distâncias por meio da obtenção da diferença de tempo entre a emissão de um pulso laser em direção a uma superfície e a detecção do sinal refletido (Renslow, 2012).

O LiDAR aerotransportado, empregado conjuntamente com a aerofotogrametria, está se

firmando como tecnologia consolidada de aquisição de dados geoespaciais para a obtenção de Modelos Digitais de Elevação (MDE), Modelos Digitais de Superfície (MDS), ortofotos e seus derivados, modelos digitais 3D de cidades, e modelos digitais 3D de paisagens (Lemmens, 2017).

O avanço dessa tecnologia tem permitido um aumento significativo na densidade dos pulsos por metro quadrado. Cada pulso refletido passa a fazer parte de um conjunto de pontos LiDAR com coordenadas E, N e h, referidas a um Sistema Geodésico de Referência, graças à utilização do

Sistema de Posicionamento Global por Satélites (GNSS) e do Sistema de Navegação Inercial (INS) durante a varredura.

A *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) criou uma classificação que ajuda a determinar a que tipo de alvo (solo, água, edificação, vegetação baixa, média ou alta, etc.) corresponde cada ponto LiDAR, gravando isso em um arquivo de formato LAS (Ferreira, 2014).

Com as informações das coordenadas, tornou-se possível avaliar geometricamente cada ponto LiDAR, ou seja, avaliar sua acurácia posicional e altimétrica, contando com outro produto de referência para a mesma área.

O presente trabalho apresenta o método para realizar a acurácia vertical dos dados de elevação digital, entre os quais se inclui o LiDAR, do Programa Nacional de Elevação Digital dos Estados Unidos (*National Digital Elevation Program – NDEP*).

2- A METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA ALTIMÉTRICA DO PROGRAMA DE ELEVÇÃO DIGITAL DOS ESTADOS UNIDOS

Nas normas brasileiras não há especificações para a avaliação da acurácia vertical dos produtos obtidos pela tecnologia LiDAR. Por esse motivo, neste trabalho adotou-se o Guia de procedimentos para aquisição de Dados de Elevação Digital (*Guidelines for Digital Elevation Data*, 2004) do Programa Nacional de Elevação Digital dos Estados Unidos (*National Digital Elevation Program – NDEP*), que também é adotado pela *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS), e trata com detalhes desse tema.

Para a compreensão dessa norma, é necessário definir três conceitos de acurácia vertical, a saber: fundamental, consolidada e suplementar.

A acurácia vertical fundamental é o valor pelo qual a acurácia vertical pode ser avaliada com segurança e comparada com um conjunto de dados de referência. Esta acurácia é calculada normalmente ao nível de confiança de 95 por cento, o que se consegue levando em conta o RMSE (*Root Mean Square Error*) vertical. Essa norma especifica que a acurácia vertical fundamental de um conjunto de dados (nuvem de pontos, TIN, MDE) deve ser determinada apenas com pontos de controle situados em terreno aberto, em que há uma probabilidade elevada de o sensor ter detectado a superfície do solo.

A acurácia vertical consolidada é o resultado de um teste de acurácia de 40 ou mais pontos de controle (valores de H) consolidados para duas ou mais das principais categorias de cobertura do solo, representando tanto o terreno aberto como outras categorias de cobertura do solo. Ela é calculada usando o percentil 95, um método de teste não paramétrico em

que 95 por cento dos erros têm valores absolutos que são iguais ou inferiores a um valor especificado. Uma acurácia vertical consolidada é sempre acompanhada por uma acurácia vertical fundamental.

A acurácia vertical suplementar é o resultado de um teste da acurácia dos valores de H sobre áreas com categorias ou combinações de categorias de cobertura do solo diferentes de terreno aberto. Ela é obtida utilizando o método percentil 95. A acurácia vertical suplementar é sempre acompanhada por uma acurácia vertical fundamental.

Os pontos de controle devem ser bem distribuídos por todo o conjunto de dados. O NDEP recomenda a seguinte orientação da *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA) na escolha da localização de pontos de controle: esses pontos devem ser distribuídos mais densamente nas proximidades das feições de maior importância e mais escassamente em áreas que são de pouco ou nenhum interesse.

Para um conjunto de dados que abranja uma área retangular que se acredita ter acurácia posicional uniforme, os pontos de controle podem ser distribuídos de modo que os pontos estejam espaçados a intervalos de pelo menos 10 por cento da distância diagonal tomada transversalmente ao conjunto de dados e, pelo menos, 20 por cento dos pontos estejam localizados em cada quadrante do conjunto de dados.

O NSSDA especifica que um mínimo de 20 pontos de controle deve ser testado, em uma distribuição que retrate a área geográfica de interesse e a distribuição do erro no conjunto de dados. Por essas definições, quando 20 pontos são testados, o nível de confiança de 95 por cento permite que um único ponto (5 por cento) ultrapasse o limite indicado nas especificações do produto.

No entanto, o NDEP recomenda seguir, sempre que possível, o padrão atual da indústria de utilizar um mínimo de 20 pontos de controle (sendo preferível 30) em cada uma das principais categorias de cobertura do solo representadas da área para a qual a modelagem digital de elevação deve ser executada. Isso ajuda a identificar erros sistemáticos potenciais em um conjunto de dados de elevação.

Assim, se forem estabelecidas cinco categorias principais de cobertura do solo, seria necessário um mínimo de 100 pontos de controle para as cinco categorias.

As categorias mais comuns de cobertura do solo, lá e entre nós, são:

- a) Terreno aberto (areia, pedra, argila, campos arados, gramados, campos de futebol);
- b) Macega e culturas;
- c) Terrenos arbustivos e árvores baixas;
- d) Áreas florestadas totalmente cobertas por árvores;
- e) Áreas urbanas com densas estruturas feitas pelo homem.

A seleção e definição das categorias de cobertura do solo devem ser baseadas ou na mistura de todos os tipos de coberturas ou nas variações da cobertura do solo para o local do projeto e no potencial efeito de cada uma na utilização do modelo da superfície.

Sempre que possível, a declividade do terreno do local onde se coletam os pontos, não deve ser mais acentuada do que 20 por cento, porque os erros horizontais vão influenciar mais acentuadamente nos cálculos do RMSE vertical. Além disso, os pontos de controle nunca devem ser selecionados perto de rupturas rigorosas (mudanças de declividade) nos taludes e outros locais semelhantes como pilares de ponte ou beira de estradas.

Uma vez que os pontos de controle foram coletados e verificados quanto a erros grosseiros, as elevações correspondentes a cada um deles devem ser extraídas de cada conjunto de dados a ser testado. Os procedimentos corretos para a obtenção destas elevações irão variar em função do modelo de dados de elevação e das ferramentas computacionais disponíveis para o teste.

Como os dados digitais de elevação (por exemplo, um conjunto de dados MDE ou TIN) não contém pontos bem definidos é quase impossível testar exatamente os mesmos pontos de controle. Portanto, geralmente é necessário interpolar uma elevação a partir do modelo de superfície na posição horizontal (E, N) de cada ponto de controle.

As interpolações, possíveis de serem realizadas, para se obter o valor de elevação nos conjuntos de dados a serem testados são:

- a) Interpolação a partir de uma TIN (produto vetorial);
- b) Interpolação a partir de um MDE (produto raster); e
- c) Interpolação a partir das curvas de nível.

O erro para cada ponto de controle é calculado subtraindo-se da cota do ponto interpolado a elevação do ponto de controle, para uma mesma posição (coordenadas E e N). Assim, se a diferença (ou erro) for um número positivo, a elevação avaliada do conjunto de dados é superior ao terreno real (ponto de controle), e se a diferença for um número negativo, a elevação avaliada do conjunto de dados é inferior ao terreno.

Para o cálculo do erro vertical, usa-se a fórmula:

$$\Delta H_i = (H \text{ dado }_i - H \text{ controle }_i) \quad (1)$$

Onde:

ΔH_i é o erro vertical no ponto i

$H \text{ dado }_i$ é a coordenada vertical do ponto i no conjunto de dados a ser testado;

$H \text{ controle }_i$ é a coordenada vertical do ponto i, de controle, obtido de uma fonte independente de acurácia maior;

i é um inteiro de 1 a n; n é o número de pontos a serem avaliados.

Para o teste de acurácia vertical fundamental, utilizando pontos de controle apenas em terreno aberto, usam-se as fórmulas (2) e (3):

$$RMSE_H = \sqrt{\left[\frac{\sum (\Delta H_i)^2}{n} \right]} \quad (2)$$

$$Acurácia_H = 1,9600 \times RMSE_H \quad (3)$$

Onde:

$RMSE_H$ é o erro médio quadrático vertical;

$Acurácia_H$ é a acurácia vertical ao nível de confiança de 95 por cento;

i é um inteiro de 1 a n; n é o número de pontos a serem avaliados.

Segundo a norma NDEP, como os erros de elevação geralmente variam com a altura e a densidade da cobertura do solo, não se pode esperar uma distribuição normal de erro e, conseqüentemente, o RMSE vertical não pode ser usado para calcular o valor da acurácia ao nível de confiança de 95 por cento. Por essa razão, um método de teste não paramétrico (percentil 95) é, então, empregado para testar a acurácia suplementar ou consolidada.

Se o teste fundamental não atender à acurácia requerida, isso indica que há um problema com a fonte, ou com o sistema de coleta, ou com o sistema de processamento ou então a acurácia alcançável pelo sistema de produção do mapa está exagerada. Se um problema sistemático puder ser identificado, ele deve ser corrigido, quando possível, e os dados corrigidos (eliminando a tendência) devem ser retestados.

A teoria se esclarece com o caso de estudo que se apresenta a seguir.

3- ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo, figura 1, compreende 22,75 km², situa-se no município de Campinas e abrange as áreas dos campi da Universidade de Campinas (UNICAMP) e da Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas); trechos da Rodovia D. Pedro I, da Estrada da Rhodia; uma área urbanizada e uma área de atividade minerária.



Fig. 1 – Localização da área de estudo.

Utilizou-se o levantamento LiDAR, executado no ano de 2012 pela empresa Fototerra Atividades de Aerolevantamentos Ltda, com densidade original de 10 pontos por m², e posterior redução para 3-4 pontos por m² para tornar o processamento mais rápido, sem perda de acuracidade, como se mostrou em Paula (2017).

Também foi utilizada a base cartográfica cedida pela Prefeitura Municipal de Campinas. Essa base foi produzida pelo Consórcio Aerocamp (Aerocarta, Base e Esteio), no ano de 2016, escala 1:10.000, no Sistema de Referência Geodésico SIRGAS2000. Esta serviu como referência.

Os dados provenientes do levantamento LiDAR são referenciados à altura elipsoidal (h). Foi necessário a conversão da altura elipsoidal para a altitude ortométrica (H). Isso foi conseguido por meio do programa computacional LASTools utilizando-se um modelo geoidal da região de Campinas (uma malha regular de espaçamento 1 km, cujas altitudes foram levantadas em campo) cedido pela empresa Base Aerofotogrametria e Projetos S. A.

Disponha-se também de pontos cotados, provenientes da Base Cartográfica de Campinas, disponíveis na área de estudo e que puderam ser usados como dados de referência para analisar a acurácia vertical da TIN gerada a partir dos pontos LiDAR.

4- METODOLOGIA DO EXPERIMENTO

A figura 2 mostra o fluxograma da metodologia empregada no experimento. Convertem-se o conjunto de pontos, classificados como solo pelo padrão ASPRS, para uma rede triangular irregular (TIN) e comparou-se os valores das elevações dos pontos cotados provenientes da base cartográfica de Campinas com as elevações dos pontos homólogos (mesmas coordenadas horizontais) interpolados na TIN por meio de programa SIG. Com isso se pode obter a acurácia vertical fundamental (AVF), a acurácia vertical suplementar (AVS), e a acurácia vertical consolidada (AVC).

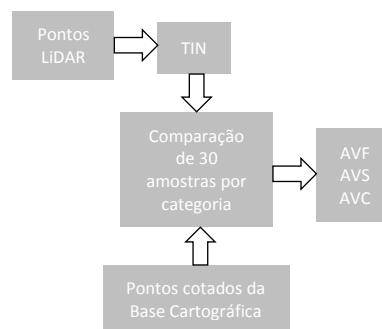


Fig. 2 – Fluxograma do experimento.

Para realizar a seleção e coleta seguiu-se a metodologia recomendada pelo NDEP de que os pontos de controle estivessem espaçados a intervalos de, pelo menos, 10 por cento da distância diagonal transversalmente ao retângulo envolvente do conjunto de dados e, pelo menos, 20 por cento dos pontos estivessem localizados em cada quadrante do conjunto de dados.

Decidido o critério de seleção, foram coletados os valores de elevação desses mesmos pontos na TIN, ou seja, nos mesmos locais (mesmas coordenadas) dos pontos cotados da base cartográfica.

Coletaram-se 30 amostras em solo nu com um espaçamento aproximado de 680 metros e, com pelo menos 6 amostras em cada quadrante da área de estudo. Essas amostras foram usadas para o cálculo da acurácia vertical fundamental utilizando as fórmulas (1), (2) e (3).

Coletaram-se 30 amostras em áreas urbanas, e 26 amostras em terrenos arbustivos, seguindo os mesmos critérios utilizados para solo nu, para realizar os cálculos da acurácia vertical suplementar utilizando a função da estatística percentil 95.

4- RESULTADOS E CONCLUSÃO

O resultado da avaliação da acurácia vertical, seguindo a norma NDEP, é apresentado na tabela 1.

O resultado da acurácia vertical fundamental foi de 4,6 cm, e, segundo a norma NDEP, deve-se redigir um texto da seguinte forma: “Produzido para atender uma acurácia vertical fundamental de 0,046 metros, ao nível de confiança de 95 por cento em terreno aberto usando $RMSE_H \times 1,9600$.”

Para calcular a acurácia suplementar foi empregado um método de teste não paramétrico, o percentil 95, porque os erros de elevação geralmente variam com a altura e a densidade de cobertura do solo, principalmente nas coberturas vegetadas, e consequentemente, não se pode esperar uma distribuição normal de erro para esses casos.

Aplicando-se a função estatística percentil 95, no programa Excel, para os erros de elevação no lote dos terrenos arbustivos e árvores baixas, chegou-se ao valor de 32,4 cm. Já o valor do percentil 95 no lote das

áreas urbanas foi de 13,6 cm. Conforme a norma NDEP é necessário informar a quantidade de erros acima do valor do percentil 95. Nesse experimento ocorreram dois erros acima do percentil 95 em cada um dos dois lotes.

Para determinar a acurácia vertical consolidada, foram utilizados os valores dos erros de elevação dos três lotes de amostragem de forma combinada, e o valor do percentil 95 para as três categorias conjuntamente foi de 27,5 cm.

O método americano tem a vantagem de especificar a acurácia por tipo de terreno (solo nu, para a acurácia fundamental, e outras classes de interesse) possibilitando que o usuário tenha uma ideia do que esperar em função de suas necessidades.

O valor combinado, no caso 27,5 cm, é um indicador, mas pode mascarar o resultado final, pois o produto está muito melhor nas áreas de solo nu, ou mesmo nas áreas urbanas, locais em que se implantarão, por exemplo, as obras de engenharia, e para as quais a acurácia combinada poderia não ser suficiente. Já para as aplicações de vegetação, a acurácia combinada estaria dando uma impressão falsa pois a acurácia específica é pior (32,4cm).

Assim, a diferenciação por classes, tal como faz a norma americana, poderia ser um bom insumo para a elaboração de uma norma brasileira para avaliar as acurácias verticais resultantes dessa tecnologia.

TABELA 1 – RESUMO DA ACURÁCIA VERTICAL SEGUINDO A NORMA NDEP

Categoria de Cobertura do Solo	Nº pontos amostrais	AVF - Acurácia Vertical Fundamental (Requisito ≤ 24,5 cm)	AVS - Acurácia Vertical Suplementar (Requisito ≤ 36,3 cm)	AVC - Acurácia Vertical Consolidada (Requisito ≤ 36,3 cm)
Áreas abertas	30	4,6 cm	-	-
Terrenos arbustivos/árvores baixas	26	-	32,4 cm	-
Áreas urbanas	30	-	13,6 cm	-
Total combinado	86	-	-	27,5 cm

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Prefeitura Municipal de Campinas e às empresas Fototerra Atividades de Aerolevantamentos Ltda, e BASE Aerofotogrametria e Projetos S. A. pela cessão dos dados utilizados nesse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), 2017. Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data.

Ferreira, F. R. Segmentação do espaço urbano por meio da tecnologia LiDAR aerotransportado. 2014. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014, 129p.

Guidelines for Digital Elevation Data. National Digital Elevation Program (NDEP), version 1.0, 2004.

Lemmens, M. The Fierce Rise of Airborne Lidar. 2017. In: GIM International Magazine, Issue 1, Volume 31, p.16-19, January.

Paula, C. F. 2017. Comparação de diferentes densidades de pontos em um perfilamento LiDAR aerotransportado para ambiente urbano regular. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017, 229p.

Renslow, M. S. 2012. Manual of Airborne Topographic LiDAR, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, 504 páginas.

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

Este trabalho é parte de uma pesquisa de doutorado que está em desenvolvimento no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.