Validação altimétrica de MDTs gerados utilizando-se de fotos obtidas a partir de uma RPA asa fixa

Ricardo Kwiatkowski Silva – Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG – ricardokds@gmail.com
Selma Regina Aranha Ribeiro – Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG – selmar.aranha@gmail.com
Neyde Fabiola Balarezo Giarola – Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG – neydef@uepg.br
Eduardo Augusto Agnellos Barbosa – Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG – eaabarbosa@uepg.br
Fabrício Tondello Barbosa – Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG – fabriciotondello@gmail.com

Resumo: Modelos Digitais de Terreno (MTEs) obtidos a partir do processamento de fotos aéreas digitais são amplamente utilizados para o entendimento dos processos erosivos. Para dar credibilidade aos estudos, faz-se necessária a aferição da qualidade posicional da modelagem matemática, validando-se também indiretamente os equipamentos utilizados no levantamento das imagens. Neste sentido, verificou-se a acurácia posicional altimétrica elipsoidal de dois MDTs gerados por meio da tecnologia Structure from Motion (SfM), aplicada a imagens tomadas em uma área não vegetada por meio da Aeronave Remotamente Pilotada (tradução para Remotely Piloted Aircraft - RPA) asa fixa eBee (senseFly SA). Classificou-se os modelos digitais controlados com base na legislação brasileira utilizando-se de quatro amostragens de pontos resultantes do pós-processamento de dados levantados por meio da técnica de posicionamento PRC (Posicionamento Relativo Cinemático). Em todas as quatro verificações realizadas para cada MDT (um matri-cial e outro vetorial), verificou-se que os produtos cartográficos são acurados pa-ra a escala 1:1000 com classificação "A" conforme o Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) altimétricos. Para obtenção dos MDTs, não foram utilizadas técnicas computacionais que visam diminuir as discrepâncias altimétricas nos pontos das amostragens digitais, pois as feições erosivas seriam atenuadas, podendo alterar resultados de processamentos posteriores.

Palavras-chave: Validação altimétrica, MDT, PEC-PCD.

Altimetric validation of Digital Terrain Models generated using photos obtained from a fixed-wing Remotely Piloted Aircraft (Drone)

Abstract: *Digital Terrain Models (DTMs) obtained from processing digital aerial photos are widely used to understand erosive processes. To ensure the credibility of studies, it is necessary to assess the positional quality of the mathematical modeling, indirectly validating the equipment used for capturing the images. In this context, the ellipsoidal altimetric positional accuracy of two DTMs generated through Structure from Motion (SfM) technology was evaluated. This technology was applied to images taken in a non-vegetated area using the fixed-wing Remotely Piloted Aircraft (RPA) eBee (senseFly SA). The digital models were classified based on Brazilian legislation, using four point samples resulting from the post-processing of data collected through the Kinematic Relative Positioning technique. In all four checks performed for each DTM (one raster and one vector), it was found that the cartographic products are accurate for the 1:1000 scale with an "A" rating according to the Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products (PEC-PCD) for altimetrics. For the generation of the DTMs, computational techniques aimed at reducing altimetric discrepancies in digital sampling points were not used, as erosive features would be mitigated, potentially altering subsequent processing results.*

Key-words: *Altimetric Validation, DTM, PEC-PCD*

1. Introdução

Modelos Digitais de Terreno (MTEs) são amplamente utilizados em estudos que visam contribuir para o entendimento dos processos erosivos. Neste sentido, o modelo de superfície pode ser representada por malhas retangulares regulares (de estrutura matricial) ou por malhas triangulares irregulares (de estrutura vetorial). Tais modelos podem ser obtidos a partir do processamento de fotos levantadas por uma Aeronave Remotamente Pilotada (tradução para Remotely Piloted Aircraft - RPA).

Para dar credibilidade aos estudos realizados, faz-se necessária a aferição da qualidade posicional da modelagem matemática dos MDTs. A validação de produtos cartográficos normalmente é realizada a partir de coordenadas conhecidas, levantadas por meio

de Sistemas Globais de Navegação por Satélite (tradução para Global Navigation Satellite System - GNSS) e de seus respectivos pontos homólogos obtidos em meio digital. A partir destas informações, pode-se averiguar a acurácia posicional, utilizando-se por exemplo do cálculo da raiz do erro médio quadrático (tradução para Root Mean Square Error - RMSE) (GUILANI, 2017), conforme as normas vigentes no Brasil (DSG, 2016) ou internacionais (ASPRS, 2024). As precisões das coordenadas levantadas ao utilizar-se de um GNSS, dependem em grande parte da técnica usada para coleta dos dados provenientes das portadoras da banda L, como no caso dos métodos de posicionamento Relativo e Diferencial (MONICO, 2008).

Nas técnicas utilizadas para realização de um levantamento posicional relativo (como por exemplo o PRC – Posicionamento Relativo Cinemático), serão necessários pelo menos dois receptores GNSS que irão rastrear no mínimo quatro satélites em comum. Um equipamento ocupa a base e o outro o ponto a ser levantado. As coordenadas com precisão, serão obtidas posteriormente após o processamento dos códigos e fases das ondas portadoras armazenados nos equipamentos. Desta forma, as coordenadas passam a apresentar precisão centimétrica (IBGE, 2017).

Neste trabalho classificou-se a acurácia posicional altimétrica de dois MTEs (um matricial e outro vetorial) obtidos pelo processamento de imagens aéreas tomadas a partir de uma RPA asa fixa. Baseando-se em dois conjuntos de amostras de pontos obtidas de um levantamento GNSS, calculou-se o RMSEz, utilizado para avaliação da acurácia vertical.

As contribuições do trabalho são promover a validação altimétrica para MDTs obtidos por meio do processamento de imagens obtidas a partir da tecnologia RPA, bem como demonstrar a influência que diferentes amostragens podem exercer no valor final do RMSEz, utilizado como parâmetro de qualidade posicional.

2. Material e Métodos

2.1 Área de Estudo

A área de estudo refere-se ao local de implantação das Megaparcelas do projeto "NAPI Prosolo", financiado pela Fundação Araucária e pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR). Por meio da figura 01 tem-se uma visão parcial da área a ser mapeada por meio da RPA e das condições do tempo na data do voo.

Figura 01 – Visão parcial da área de levantamento



Fonte: Os autores

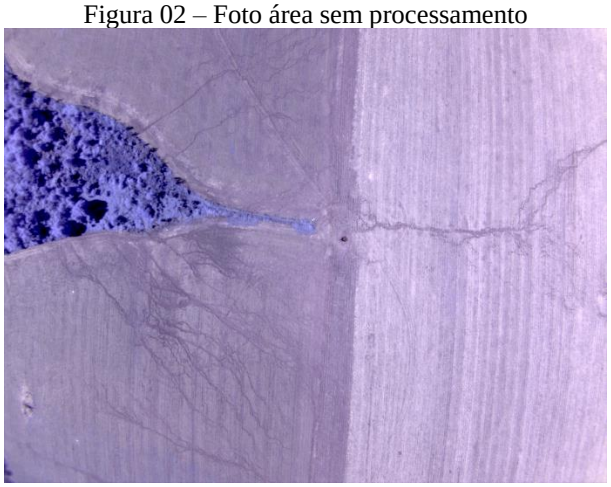
2.2 Levantamento GNSS

As coordenadas geodésicas utilizadas neste trabalho, como pontos de controle (tradução para Ground Control Points - GCPs) ou como pontos de checagem para validação altimétrica elipsoidal dos MDTs, foram levantadas e processadas pela equipe do Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia (LAGEH), da Universidade Estadual do Paraná (UFPR). Os métodos de posicionamento por satélites utilizados foram o RTK, por meio do qual foram levantados os GCPs (utilizados para o processamento das imagens aéreas), e o PRC (utilizado para determinar as altitudes elipsoidais ou coordenadas Z dos pontos de checagem).

2.3 Processamento das fotos aéreas

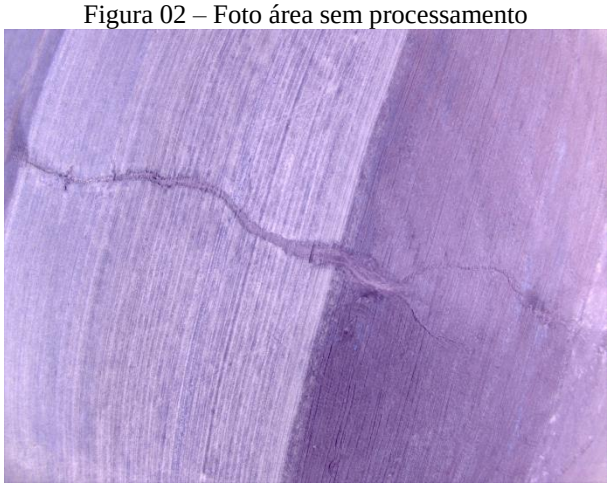
Para o levantamento das imagens utilizou-se da câmera Canon S110 NIR adaptada para utilização na aeronave asa fixa eBee (senseFly SA). As figuras 02 e 03 exemplificam 2 fotos sem processamento captadas durante o voo.

Figura 02 – Foto área sem processamento



Fonte: Os autores

Figura 02 – Foto área sem processamento



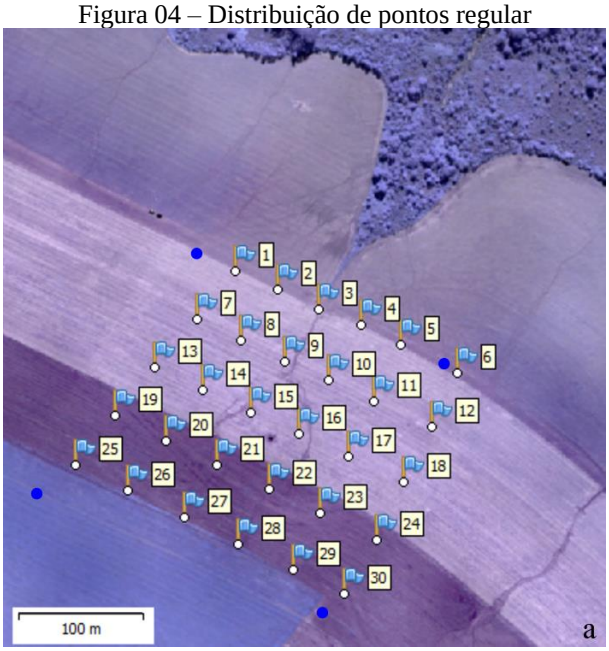
Fonte: Os autores

Utilizando-se de 04 GCPs obtidos em terreno aberto, as 255 imagens aéreas foram submetidas a fototriangulação com o parâmetro de acuracidade em modo elevado (tradução para Highest) no programa Agisoft Metashape. Desativou-se o parâmetro de pré-seleção de pares e definiu-se a quantidade máxima de 40.000 e mínima de 4.000 pontos correspondentes entre as áreas de recobrimento das imagens aéreas. Seguiu-se a densificação da nuvem esparsa resultante por meio do processamento Build Dense Cloud (Construir Nuvem Densa) com o nível de qualidade Ultra high (Ultra Alta). A partir desta elaborou-se um modelo tridimensional de malha quadrangular regular e um modelo tridimensional de malha triangular irregular usando-se a opção que determina a quantidade de faces como High (elevada).

2.4 **Seleção dos pontos para validação**

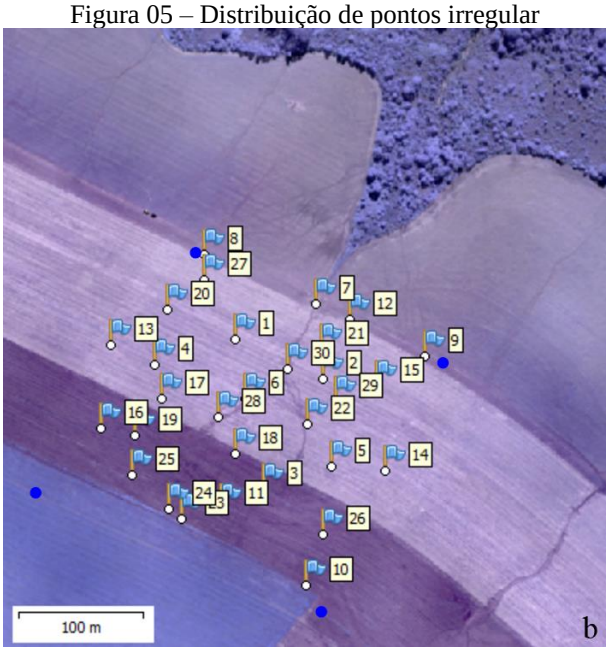
Visualiza-se, por meio da figura 04, a espacialização da amostragem de pontos selecionados de forma regular (em grade) e na figura 05 a espacialização da amostragem de pontos selecionados de maneira irregular. Nas imagens supracitadas pode-se verificar o ortomosaico falsa cor infravermelho gerado no processamento das 255 fotos e o posicionamento dos 04 GCPs na cor azul, localizados nos extremos da área de estudo.

Figura 04 – Distribuição de pontos regular



Fonte: Os autores

Figura 05 – Distribuição de pontos irregular



Fonte: Os autores

Cada amostragem altimétrica é composta por 30 pontos. A partir das duas distribuições diferentes de amostras de coordenadas obtidas pelo levantamento GNSS (regular e irregular), realizaram-se 4 procedimentos de validação (2 para avaliação do modelo tridimensional de malha quadrangular regular e 2 para avaliação do modelo de malha triangular irregular).

2.5 Métrica para avaliação da acurácia

A partir das coordenadas Z do levantamento GNSS cinemático e das coordenadas Z homólogas extraídas dos modelos nos 30 pontos selecionados de forma regular e dos 30 pontos selecionados de maneira irregular, realizou-se o cálculo do RMSE para verificação da acurácia posicional altimétrica conforme a fórmula representada na figura 06.

Figura 06 – Fórmula do RMSE

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=n}^{n} \frac{[f(x_i) - x_i]^2}{n}}$$

Apesar da legislação no Brasil e das normas da Sociedade Americana para Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (tradução para American Society for Photogrammetry and Remote Sensing - ASPRS) não exigirem que sejam realizados testes de verificação de erros sistemáticos no conjunto de dados, utilizou-se do teste t de Student, conforme implementação desenvolvida para o programa GeoPEC [8]. O teste tem por objetivo verificar se às diferenças entre as coordenadas altimétricas obtidas digitalmente são significativas em relação às coordenadas altimétricas pós processadas do levantamento GNSS.

O teste supracitado pressupõe a normalidade e um nível de confiança igual a 90%, obedecendo às seguintes hipóteses referentes à coordenada Z: Para H0 se dz = 0, então Z não é tendencioso e para H1 se dz ≠ 0, então Z é tendencioso conforme a equação representada na figura 07.

Figura 07 – Fórmula do Teste t

$$t_{calc_Z} = \frac{\overline{d_Z}.\sqrt{n}}{S_{d_Z}} \qquad |t_{calc_Z}| < t_{(n-1,\alpha/2)}$$

Adicionalmente, calculou-se o RMSEr referente as coordenadas X e Y da base GNSS, como indicativo da qualidade planimétrica dos modelos.

3. Resultados

Inicialmente verificou-se a distribuição espacial das amostras por meio do programa GeoPEC (SANTOS, 2019). O programa supracitado considerou os dois grupos de amostras como sendo de distribuição espacial "dispersa" para a 1ª, 2ª e 3ª ordens considerando-se uma área de estudo de 5,5 hectares.

Aplicou-se os cálculos por meio de planilha eletrônica aos quatro conjuntos de dados. Apresenta-se na figura 08 os resultados das discrepâncias para cada coordenada altimétrica (ΔZ), obtidas a partir das coordenadas geodésicas pós-processadas e das coordenadas modeladas matematicamente, extraídas dos MDTs matricial e vetorial, bem como o valor final do RMSE.

Figura 08 – Cálculo do RMSE

Amostragem regular						Amostragem irregular					
		MDT quadrangular		MDT triangular				MDT quadrangular		MDT triangular	
Id	Z (GNSS)	Z (MDT)	Δ Z	Z (MDE)	Δ Z	Id	Z (GNSS)	Z (MDT)	Δ Z	Z (MDE)	Δ Z
1	1006,517	1006,433	0,01	1006,428	0,01	1	1010,448	1010,432	0,00	1010,427	0,00
2	1004,362	1004,248	0,01	1004,245	0,01	2	1010,019	1010,052	0,00	1010,047	0,00
3	1003,884	1003,881	0,00	1003,868	0,00	3	1018,809	1018,994	0,03	1018,991	0,03
4	1004,209	1004,109	0,01	1004,111	0,01	4	1017,480	1017,645	0,03	1017,640	0,03
5	1006,349	1006,280	0,00	1006,277	0,01	5	1017,085	1017,103	0,00	1017,098	0,00
6	1008,386	1008,366	0,00	1008,354	0,00	6	1013,449	1013,405	0,00	1013,405	0,00
7	1012,709	1012,611	0,01	1012,608	0,01	7	1003,439	1003,309	0,02	1003,300	0,02
8	1010,448	1010,432	0,00	1010,427	0,00	8	1007,584	1007,520	0,00	1007,514	0,00
9	1008,647	1008,570	0,01	1008,567	0,01	9	1007,491	1007,435	0,00	1007,437	0,00
10	1010,019	1010,052	0,00	1010,047	0,00	10	1023,370	1023,586	0,05	1023,583	0,05
11	1012,052	1011,967	0,01	1011,959	0,01	11	1021,883	1022,160	0,08	1022,152	0,07
12	1012,692	1012,654	0,00	1012,642	0,00	12	1003,895	1003,813	0,01	1003,804	0,01
13	1017,934	1018,031	0,01	1018,033	0,01	13	1018,785	1018,672	0,01	1018,682	0,01
14	1015,59	1015,749	0,03	1015,752	0,03	14	1016,761	1016,510	0,06	1016,507	0,06
15	1014,178	1014,290	0,01	1014,283	0,01	15	1010,756	1010,615	0,02	1010,610	0,02
16	1014,526	1014,535	0,00	1014,532	0,00	16	1023,003	1023,184	0,03	1023,186	0,03
17	1016,309	1016,193	0,01	1016,179	0,02	17	1018,749	1018,876	0,02	1018,875	0,02
18	1016,619	1016,637	0,00	1016,634	0,00	18	1017,907	1018,057	0,02	1018,051	0,02
19	1022,148	1022,321	0,03	1022,322	0,03	19	1022,095	1022,282	0,03	1022,277	0,03
20	1020,899	1021,063	0,03	1021,064	0,03	20	1013,825	1013,734	0,01	1013,729	0,01
21	1019,679	1019,914	0,06	1019,907	0,05	21	1006,883	1006,824	0,00	1006,818	0,00
22	1018,809	1018,994	0,03	1018,990	0,03	22	1013,619	1013,721	0,01	1013,727	0,01
23	1019,503	1019,676	0,03	1019,669	0,03	23	1023,765	1023,976	0,04	1023,974	0,04
24	1019,559	1019,793	0,05	1019,784	0,05	24	1023,795	1024,006	0,04	1024,001	0,04
25	1025,398	1025,611	0,05	1025,612	0,05	25	1023,716	1023,996	0,08	1023,994	0,08
26	1024,437	1024,704	0,07	1024,706	0,07	26	1020,973	1021,065	0,01	1021,065	0,01
27	1023,66	1023,936	0,08	1023,913	0,06	27	1009,194	1009,117	0,01	1009,107	0,01
28	1023,017	1023,249	0,05	1023,250	0,05	28	1015,715	1015,822	0,01	1015,818	0,01
29	1023,337	1023,625	0,08	1023,619	0,08	29	1012,113	1012,116	0,00	1012,110	0,00
30	1022,26	1022,504	0,06	1022,502	0,06	30	1008,839	1008,714	0,02	1008,716	0,02
		RMSE	**0,16**	**RMSE**	**0,16**			**RMSE**	**0,15**	**RMSE**	**0,15**

Verificou-se assim que os dois MDTs avaliados possuem RMSEz de 0,16 metros considerando-se a amostragem regular e RMSEz de 0,15 metros considerando-se a amostragem irregular.

A maior acurácia verificada para a amostragem irregular de pontos não necessariamente resulta da forma de distribuição e sim devido a

alterações no alto topográfico da área de estudo ocorridas após o levantamento GNSS.
Verifica-se também que os modelos triangulares (vetoriais) podem apresentar acurácia diferente em relação aos modelos retangulares (matriciais), partindo-se de uma mesma amostragem. Isto pode ser explicado pelo fato de que os triângulos gerados na modelagem derivam diretamente de pontos originais, não havendo alteração de dados para suavização da superfície (GONÇALVES, 2006).
Baseando-se nas discrepâncias verificadas nas amostragens, aplicou-se o teste t de Student para verificação de erros sistemáticos. Para esta verificação utilizou-se o teste supracitado, conforme implementação desenvolvida no programa GeoPEC.

Tabela 01 – Resultados dos testes de tendência

Amostras	**Shapiro-Wilk**	**t calc z**
MDT quadrangular (amostragem regular)	não normal	-
MDT triangular (amostragem regular)	não normal	-
MDT quadrangular (amostragem irregular)	normal	1,6489
MDT triangular (amostragem irregular)	normal	1,5257

Os resultados dos testes demonstraram a não normalidade das amostras obtidas de forma regular (em grade) e a normalidade das amostras obtidas de maneira aleatória. Desta forma verificou-se a inexistência de tendência somente para as amostragens aleatórias, baseando-se em um valor t tabelado de 1,6991.

3. Conclusões

Os valores de RMSE obtidos (0,16 metros e 0,15 metros) enquadram, conforme as normas brasileiras (DSG, 2016), os MDTs na Classe A para escala 1:1000 em altimetria. A presença de erros sistemáticos não pôde ser verificada para a amostragem regular (em grade) pois o teste t pressupõe a normalidade.

Agradecimentos

A Fundação Araucária e ao Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR) pelo apoio financeiro ao projeto. A Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (MESAGRO - UEPG). A Profª Alaine Margarete Guimarães (UEPG) e a Profª Cláudia Pereira Krueger (UFPR).

Referências

ASPRS. Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. Disponível: https://www.asprs.org/
Acesso em: 21 ago. 2024

DSG. **Norma da Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG)**. Brasil, 2016.

GHILANI, C. D. **Adjustment Computations: Spatial Data Analysis.** 6ª ed. John Wiley & Sons, 720 p., 2017.

GONÇALVES, G. Analysis of interpolation erros in urban digital surface models created from LIDAR data. **Proceedings of the 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences**. Portugal, 160-168 p., 2006.

IBGE. Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Brasil, 2017.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: ed. UNESP. 480p. 2008.

SANTOS, A. P. **GeoPEC - Software científico para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais.** Manual versão 3.5.2., 2019.