

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N^o 67/7: 1467-1477
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

AVALIAÇÃO POSICIONAL DE MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE DERIVADO DE CÂMARA DE PEQUENO FORMATO

*Positional Evaluation of Digital Superficial Model Generated
by Small Format Camera*

**Giuliano Sant'Anna Marotta, Rejane Ennes Cicerelli,
Alexandre Moreno Richwin Ferreira, Henrique Lhacer Roig
& Mário Alexandre de Abreu**

**Universidade de Brasília – UnB
Instituto de Geociências – IG**

Campus Darcy Ribeiro - Brasília - DF. CEP: 70910-900

{marota, roig}@unb.br, rejane_e@yahoo.com.br, moreno.rferreira@gmail.com, mabreu01@terra.com.br

*Recebido em 18 de Novembro, 2014/ Aceito em 02 de Setembro, 2015
Received on November 18, 2014/ Accepted on September 02, 2015*

RESUMO

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) vêm sendo, nos últimos anos, empregados para finalidades diversas. Para tornar viável a aplicação de microVANT em aerolevantamentos, é necessária a utilização de sensores leves e de baixo custo. No entanto, para assegurar qualidade posicional e verificar a sua aplicabilidade prática, torna-se necessário analisar as potencialidades das tecnologias citadas. Este trabalho avalia os Modelos Digitais de Superfície (MDS) gerados a partir das imagens obtidas por uma câmara de pequeno formato a bordo de um microVANT, tomando como referência MDS gerado por perfilhamento realizado por sistema LiDAR (*Light Detection And Ranging*) aerotransportado por aeronave tripulada. Com a análise estatística dos resultados, verificou-se que o microVANT e a câmara de pequeno formato utilizados neste trabalho possibilitam a geração de MDS de boa qualidade, similar ao gerado por processamento LiDAR.

Palavras chaves: Câmara de Pequeno Formato, MicroVANT, Qualidade Posicional, MDS.

ABSTRACT

Unmanned Aerial Vehicles (UAV) has been, in recent years, used for various purposes. To make possible to apply the microUAV in airborne surveys, the use of lightweight and low-cost sensors is required. However, to ensure the positional quality and check its practical applicability, it is necessary to analyze the potential of the referred technologies. This paper evaluates the Digital Superficial Models (DSM) generated from images obtained by a small format camera aboard a microUAV, using as reference DSM generated by profiling made by LiDAR system (*Light Detection And Ranging*) airborne by manned aircraft. It was found, by statistical analysis, that DSM with high spatial resolution showed good results, similar with those generated by LIDAR processing.

Keywords: Small Format Camera, Micro UAV, Positional Quality, DSM.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) e câmara de pequeno formato em atividades civis têm crescido exponencialmente no âmbito do sensoriamento remoto aerotransportado e fotogrametria em grandes escalas (COLOMINA, 2014). Dentre as atividades, pode-se destacar a gestão de recursos naturais (HORCHER & VISSER, 2004), monitoramento do uso e ocupação do solo (SUGIURA, *et al.*, 2005; GONÇAVES & HENRIQUES, 2013), monitoramento de incêndios florestais (ZHOU *et al.*, 2005), agricultura de precisão (REIDELSTUERZ *et al.*, 2007), arqueologia (BENDEA, *et al.*, 2007; HERNANDEZ *et al.*, 2015), mineração e fiscalização (ROCK *et al.*, 2011), segurança e meio ambiente (ROIG *et al.*, 2013) e cartografia (REMONDINO *et al.*, 2011; MAROTTA *et al.*, 2015).

A expansão no uso dessas aeronaves pode ser justificada pela evolução tecnológica dos componentes eletrônicos, como microcontroladores, receptores GNSS e sistemas inerciais (VALLET *et al.*, 2011). Além disso, estas tecnologias acopladas a aeronaves remotamente pilotadas vêm ganhando espaço nas geociências, pois, permitem a coleta de dados com alta resolução espacial e temporal, com baixo custo (RUZGIENE *et al.*, 2015; COLOMINA, 2014).

Dentre os principais produtos derivados do sensoriamento remoto por VANT para uso em mapeamento, pode-se destacar o Modelo Digital de Superfície (MDS) e a ortofoto, segundo Colomina (2014). O MDS, por sua vez, é caracterizado pela representação tridimensional digital da superfície topográfica que compreende pontos do terreno e acima deste, tais como feições antrópicas (edificações, rodovias) e vegetação. Esta representação, segundo Oliveira e Tommaselli (2014), é essencial: para avaliação de impactos ambientais; políticas públicas; projetos de infraestrutura; geração de ortomagens; e como fonte de dados para Sistemas de Informações Geográficas (SIG). No entanto, considerando a fragilidade do sistema (VANT e câmara de pequeno formato) e segundo Colomina (2014), pouco se sabe quanto à qualidade dos produtos gerados, tais como a precisão métrica e fidelidade morfológica.

Haarbrink & Eisenbeiss (2008), Rock *et al.* (2011), Sauerbier *et al.* (2011), Stefanik *et al.* (2011), Sona *et al.* (2014), Ruzgiene *et al.* (2015) e Hernandez *et al.* (2015) discutem o assunto e avaliam a qualidade posicional desses modelos por meio de diferentes métodos. Em consonância com seus resultados, entende-se que a utilização de câmaras de pequeno formato a bordo de um VANT ainda é um tema que merece atenção, pois, segundo Ruzgiene *et al.* (2015), a qualidade dos dados depende tanto das características dos sensores quanto do desempenho do voo (velocidade, características do VANT, influência atmosférica e condições ambientais).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi analisar a qualidade posicional altimétrica de um MDS gerado a partir de dados obtidos por câmara de pequeno formato a bordo de um microVANT. Para tanto, o MDS resultante foi comparado com um MDS gerado por dados LiDAR aerotransportado, utilizado como referência.

2. ÁREA DE ESTUDOS

Para a realização deste trabalho, foi utilizada uma área de aproximadamente 100 hectares que está localizada próxima à área urbana de Brasília, no setor rural da Região Administrativa de São Sebastião, representada pela Figura 1. A área de estudos apresenta relevo plano a ondulado, com variação máxima de 105 m de altitude, onde há a presença de rodovias, pequenas edificações rurais, estradas vicinais e matas com diferentes dimensões.

3. METODOLOGIA

Este trabalho envolveu, para a área de estudos, a identificação e estimativa das coordenadas de pontos de apoio em campo, a aquisição de imagens com câmara de pequeno formato a bordo de um microVANT, processamento e obtenção de dados posicionais do terreno derivados da câmara de pequeno formato e avaliação da qualidade posicional altimétrica do MDS gerado comparado com MDS gerado com os dados LiDAR aerotransportado.

Ressalta-se, neste trabalho, que os dados LiDAR e as imagens obtidas a bordo do microVANT e foram adquiridas em diferentes épocas.

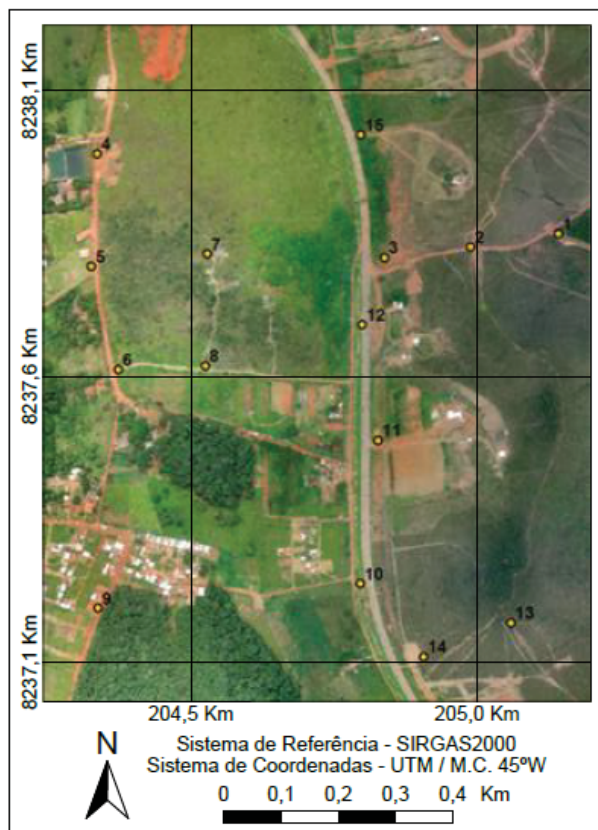


Fig. 1 - Área de estudos. Os pontos representados e numerados referem-se ao apoio de campo, cujas coordenadas foram utilizadas como referência no processamento das imagens obtidas a bordo do microVANT.

3.1 Determinação e Coleta de Pontos de Apoio em Campo

Para o processamento fotogramétrico das imagens (aerotriangulação) obtidas neste trabalho, foram coletados informações de 15 pontos de apoio de campo (Fig.1) distribuídos em toda a área de estudos. Os pontos de apoio foram posicionados em feições bem visíveis na imagem, tais como calçadas, cruzamento de vias, rotatórias, entre outras.

As coordenadas dos pontos de apoio de campo foram obtidas com o uso de receptores GNSS *Topcon Hiper Lite*, por meio do método de posicionamento relativo estático, conforme descrito por Monico (2008). No processamento, foi utilizado como referência a estação BRAZ (SAT 91200), pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – RBMC, de controle do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. A escolha desta estação de referência se deu por sua proximidade

com a área de estudos, aproximadamente 10 quilômetros. Após processamento, as coordenadas dos pontos 15 pontos selecionados apresentaram precisões na ordem de 5 cm.

3.2 Aerolevanteamento com uso de MicroVANT e Câmara de Pequeno Formato

Na coleta dos dados com câmara de pequeno formato utilizou-se o microVANT Graúna (Fig. 2) produzido e operado pela TerraSense. O microVANT Graúna é uma aeronave de asa fixa que possui 1,8 m de envergadura e pesa 2,6 kg quando equipado com uma câmara de pequeno formato.



Fig. 2 - microVANT Graúna.

A aeronave é capaz de realizar missões de forma automática, navegando por pontos previamente definidos e capturando imagens em coordenadas definidas. Para isto a aeronave é equipada com um piloto automático integrado a diversos sensores, como receptor GNSS, magnetômetro de 03 eixos, acelerômetro de 03 eixos, giroscópio de 03 eixos, sensor de velocidade do ar e barômetro, que permitem o controle e a navegação da aeronave de maneira autônoma. Além dos sensores, a aeronave possui dois sistemas de comunicação com o computador em solo, sendo um responsável pelo controle manual da aeronave, para possíveis intervenções do operador, e o outro para transmissão de dados como posição, velocidade e condições da bateria. Ambos os sistemas operam de forma individual e em frequências diferentes para redundância no caso de uma possível falha.

Dos sensores citados apenas foi utilizado o receptor GNSS para o processamento

fotogramétrico, cujas coordenadas foram estimadas em tempo real, por meio da técnica de posicionamento absoluto por código C/A.

A câmara utilizada a bordo do microVANT foi uma *Canon*, modelo *PowerShot S100*, equipada com sensor CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) com 4000 x 3000 elementos e tamanho do quadro focal de 7,6 x 5,7 mm, onde cada fotodetector possui dimensão de 1,9 μ m.

Os parâmetros de orientação interior do sensor utilizado (Tabela 1), necessário para o processamento fotogramétrico das imagens, foram previamente estimados pelo método de autocalibração, ou calibração em serviço, e apresentados por Marotta *et al.* (2015). Dos parâmetros citados e apresentados na Tabela 1, é a distância focal; x_0 , y_0 são as coordenadas fiduciais do ponto principal no sistema de coordenadas da câmara; k_1 , k_2 , k_3 são os coeficientes de distorção radial; P_1 , P_2 são os coeficientes de distorção descentrada; s é o coeficiente de não perpendicularidade, s ou inclinação, entre os eixos cartesianos do sistema de coordenadas da câmara.

Tabela 1: parâmetros de orientação interior da câmara *Canon*, modelo *Powershot S100*

Parâmetros	Valores
f (mm)	5,526
x_0 (mm)	3,732
y_0 (mm)	2,654
s	3,926E-04
k_1 (mm ⁻²)	-5,728E-05
k_2 (mm ⁻⁴)	6,670E-06
k_3 (mm ⁻⁶)	1,604E-05
P_1 (mm ⁻¹)	-1,223E-05
P_2 (mm ⁻¹)	2,695E-06

Fonte: Marotta *et al.* (2015).

A altura média de voo para a coleta das imagens foi de 250 m, com superposição longitudinal e lateral de 80% e 60%, respectivamente. A resolução espacial média resultante foi de 7 cm. Para o recobrimento total da área analisada foram necessárias 205 imagens registradas em 6 faixas paralelas de voo, cada uma com aproximadamente 1,6 km de comprimento.

Para o processamento fotogramétrico (estimativa dos parâmetros da orientação exterior), foi utilizado o software *PhotoScan Professional*.

3.3 Aerolevantamento com Sistema LIDAR

Os dados LiDAR foram coletados utilizando o sensor *Laser Scanner ALS60*, fabricado pela *Leica Geosystems*. O sensor possui capacidade de operar a uma altitude de até 6000 metros, com frequência máxima de operação de 200.000 pulsos por segundo (200 khz) e o maior ângulo de visada de 75°.

O perfilhamento LiDAR, na área de estudos, foi realizado a uma altura média de voo de 1138 m e velocidade de 259 km/h. Foi utilizado ângulo de visada de 40°, resultando em uma faixa de varredura com 828 m de largura média. Os pulsos foram gerados com um padrão senoidal a uma frequência de 178,6 Khz, obtendo uma média de 3,27 pontos por metro quadrado.

Neste trabalho, as coordenadas dos pontos de campo gerados pelo sistema LiDAR foram processados e fornecidos, pela Topocart Topografia Engenharia e Aerolevantamentos S/S Ltda.

3.4 Geração de MDS

A geração dos MDS foi realizada por meio de coordenadas terrestres de nuvens de pontos extraídas do processamento dos dados LiDAR, MDS de referência, e do processamento fotogramétrico das imagens provenientes da câmara de pequeno formato, MDS avaliado. Foi considerado, portanto, a menor densidade apresentada entre os diferentes métodos de aerolevantamento realizados para definição da resolução espacial.

Para transformar os valores de altimetria da nuvem de pontos em uma malha regular, visando a representação do MDS no formato matricial, primeiramente foi considerada a dimensão dos elementos da malha (resolução espacial) e, posteriormente, atribuídos os valores de altimetria para cada elemento. Neste caso, os valores de altimetria do MDS foram calculados pela média dos valores de altitude dos pontos vetoriais, contidos em cada elemento da malha, e a interpolação utilizada foi o vizinho natural mais próximo. Segundo Sibson (1981), este método de interpolação empregado procura um

subconjunto de amostras próximas ao ponto de interesse e aplica-lhes pesos com base em áreas proporcionais a fim de interpolar um valor.

3.5 Avaliação da Qualidade Posicional

Como método de avaliação da precisão posicional planimétrica (σ) e altimétrica (σ_z), utilizou-se o Erro Médio Quadrático planimétrico (EMQ_XY) e altimétrico (EMQ_Z) (MAUNE *et al.*, 2001; MATOS, 2005; PREOSCK, 2006), a 95% de confiança (GREENWALT & SCHULTZ, 1968; MATOS, 2005; PREOSCK, 2006). Para isto, os resíduos foram considerados livres de tendências e assumiu-se que estes obedecem a uma distribuição normal.

$$EMQ_{X;Y;Z} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i;Y_i;Z_{obs} - X_i;Y_i;Z_{ref})^2}{n}} \quad (1)$$

$$EMQ_{XY} = \sqrt{EMQ_X^2 + EMQ_Y^2} \quad (2)$$

$$P_p = 2,4477 \cdot 0,5 \cdot EMQ_{XY} \quad (3)$$

$$P_z = 1,9600 \cdot EMQ_Z \quad (4)$$

sendo X_{obs} , Y_{obs} , Z_{obs} são coordenadas observadas após processamento; X_{ref} , Y_{ref} , Z_{ref} são coordenadas observadas utilizadas como referência.

A primeira avaliação da qualidade posicional foi a verificação da precisão do processamento fotogramétrico e dos dados LiDAR. Para isto, foram calculados os resíduos referentes às coordenadas dos pontos de apoio utilizados. Estas coordenadas foram estimadas por meio das imagens, após orientação exterior, e pelos dados de posicionamento GNSS coletados em campo. No caso dos dados LiDAR, a nuvem de pontos altimétricos não necessariamente coincidem planimetricamente com os pontos de apoio. Por causa disto, os resíduos foram calculados utilizando valores de altitude dos pontos mais próximos aos pontos de apoio.

A segunda avaliação foi realizada utilizando MDS derivado da altimetria obtida pelo sistema LiDAR, como referência, e confrontando-os com MDS derivado da altimetria obtida pelo uso de câmara de pequeno formato. Para verificação dos resultados da segunda análise, foram definidos 9 perfis (Fig. 3) para extração

de dados de altimetria, localizados em regiões distintas da área de estudos. Os perfis seguiram prioritariamente as áreas de menor variação temporal de feições, como rodovias, estradas e caminhos, de forma a minimizar interferências nas análises causadas por mudanças no tamanho da vegetação e por atividades antrópicas, como apresentados. No entanto, dos 9 perfis definidos seguindo o critério apresentado, o perfil 3 (Fig. 3) foi retirado da análise por apresentar interferências causadas por mudanças antrópicas entre os períodos dos aerolevantamentos realizados (Fig. 4).

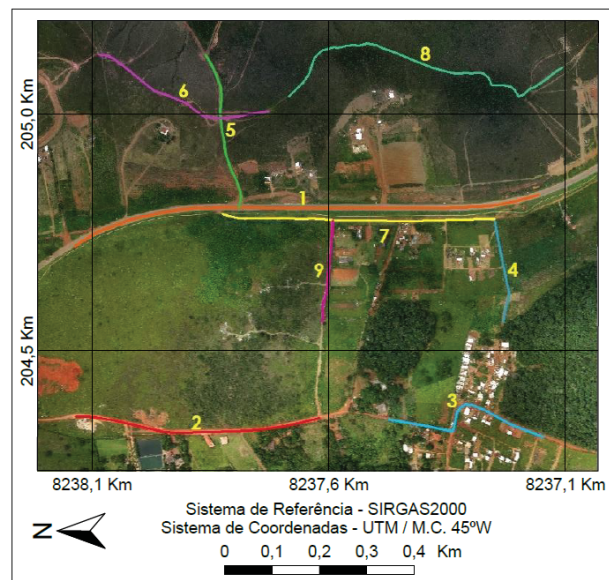


Fig. 3 - Perfis utilizados para verificação dos resultados altimétricos do MDS gerado pelo processamento fotogramétrico, utilizando como referência o MDS gerado por processamento de dados do sistema LiDAR.



Fig. 4 - Destaque (círculos vermelhos) para uma área no perfil 3, retirado da análise, onde mostra a incidência de ações antrópicas entre os períodos dos aerolevantamentos realizados. “a” representa o período do aerolevanteamento LiDAR, “b” o período do aerolevanteamento microVANT.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após processamento dos dados dos aerolevantamentos realizados, envolvendo câmara de pequeno formato a bordo do microVANT e sistema LiDAR a bordo de aeronave tripulada, e utilizando como referência as coordenadas dos pontos de apoio de campo apresentados na Fig. 1, foi possível estimar os e e s , entre coordenadas planimétricas e altimétricas processadas e de referência, conforme apresentados na Tabela 2.

Verifica-se, na Tabela 2, que o e dos resíduos das coordenadas planimétricas, após o processamento fotogramétrico da câmara *Canon PowerShot S100*, corresponde a 0,260m (3,728 pixels), com precisão planimétrica de 0,319m (4,551) pixels a 95% de confiança.

Tabela 2: Precisão resultante do processamento de dados dos aerolevantamentos realizados

Aeronave	microVANT		SÊNECA -II
Câmara	<i>PowerShot S100</i>		<i>ALS60</i>
Unidade	m	pixel	m
GSD	0,070	1,000	-
DQM_x	0,232	3,314	-
DQM_y	0,118	1,686	-
DQM_{xy}	0,260	3,718	-
DQM_z	0,191	2,729	0,179
P_p	0,319	4,551	-
P_z	0,374	5,348	0,352

Na análise altimétrica, percebe-se que o sensor LIDAR *ALS60* apresentou resultados semelhantes aos da câmara *Canon PowerShot S100*, com precisão altimétrica de 0,352m a 95% de confiança. Esta precisão, diferentemente do processo fotogramétrico, está diretamente relacionada à precisão angular do sensor inercial, à precisão posicional dada pelo processamento dos dados provenientes do receptor GNSS a bordo da aeronave e à precisão dos pontos de apoio de campo utilizados como referência terrestre. Além disto, para análise da precisão altimétrica, as coordenadas verticais precisam ser interpoladas para a posição planimétrica do ponto de apoio de campo, o que torna este processo sensível às pequenas variações de relevo do entorno.

Devido a variação da quantidade de pontos terrestres gerados (nuvem de pontos) após processamento de dados LiDAR *ALS-60* (3,27 pontos/m²) e câmara *Canon PowerShot S100* (23 pontos/m²), verificou-se a necessidade de geração de MDS (Fig. 5) com resolução espacial de 0,5m, de forma a normalizar as informações altimétricas necessárias para análise.

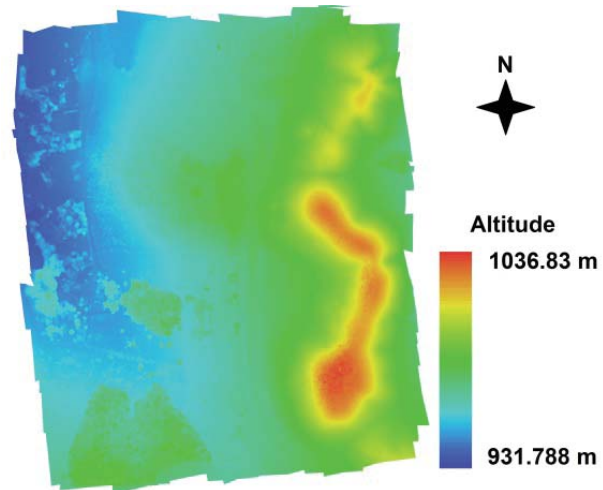


Fig. 5 - MDS gerado após processamento dos dados da câmara de pequeno formato a bordo do microVANT.

Há de se considerar, na análise realizada, as características de obtenção de informações por diferentes sensores. No caso de sensores passivos, como os utilizados na fotogrametria, a detecção de informações se dá pela radiação eletromagnética emitida e refletida pela camada mais externa da superfície. Já os sensores ativos, como o LiDAR, possibilita a detecção de diferentes retornos de um mesmo pulso emitido, permitindo obter informações abaixo de folhas e galhos (Figs. 6a e 6b). Segundo Oliveira e Tommaselli (2014), o levantamento utilizando um sistema de varredura a LiDAR permite maior facilidade na aquisição de pontos em áreas de vegetação e em áreas homogêneas, que são áreas difíceis de serem corretamente estimadas com técnicas de correspondência de imagens. No entanto, o custo deste sistema é relativamente alto comparado com a utilização de sensores passivos, que tem como vantagem adicional o fornecimento de informações de textura e de radiometria dos elementos presentes na cena.

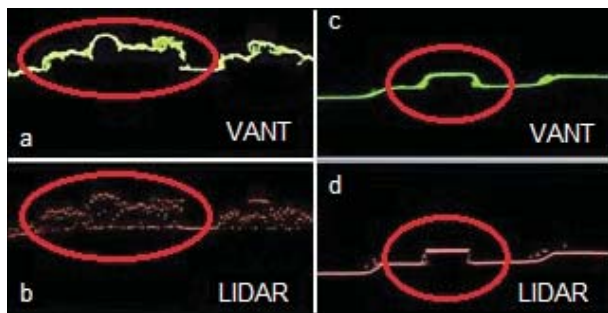


Fig. 6 - “a” e “b” representam nuvens de pontos, em perfil, de uma área de mata destacando a possibilidade do LIDAR obter dados abaixo do dossel (a e b). “c” e “d” representam nuvens de pontos, em perfil, com destaque para a representação de uma edificação.

É possível também observar que a nuvem de pontos gerada por LiDAR é capaz de detectar variações altimétricas com ângulos mais acentuados, de maneira mais precisa, como as paredes de edificações (Figs. 6c e 6d). Sendo assim, percebe-se que as nuvens de pontos obtidas a partir de processamento fotogramétrico das imagens apresentaram maior suavização angular, representando alguns objetos de maneira menos fiel.

A suavização apresentada na representação dos dados altimétricos, provenientes de nuvens de pontos obtidas a partir do processamento fotogramétrico, pode ser explicada pelo efeito de sombra (Fig. 7) que ocorre em algumas áreas. Este efeito reduz, segundo Aber *et al.* (2010), a identificação de pontos e causando lacunas de informação no MDS.

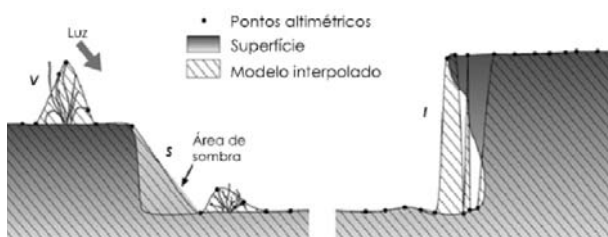


Fig. 7 - Representação de erros comuns á utilização de métodos automáticos para criação modelos digitais de elevação. Fonte: Aber *et al.* (2010).

O MDS gerado pelos dados provenientes da câmara de pequeno formato foram analisados, tomando como referência o MDS gerado pelos dados do sistema LiDAR e utilizando as

variações dos valores altimétricos obtidos nos 8 perfis selecionados na área de estudos. Os resultados mostram que os resíduos máximo e mínimo encontrados foram de 0,808 m e -0,508 m, respectivamente. Do total de resíduos, 95,07% estão concentrados no intervalo de ± 50 cm (Fig. 8).

Dos resultados de precisão, verifica-se (Tabela 3) um e total de 0,238 m e 0,467 m, respectivamente. Estes valores (Tabela 3) são resultantes dos resíduos de 3409 pontos identificados no terreno, em 8 perfis analisados, mostrados nas Figuras 9 a 16, dos quais apresentam diferentes precisões.

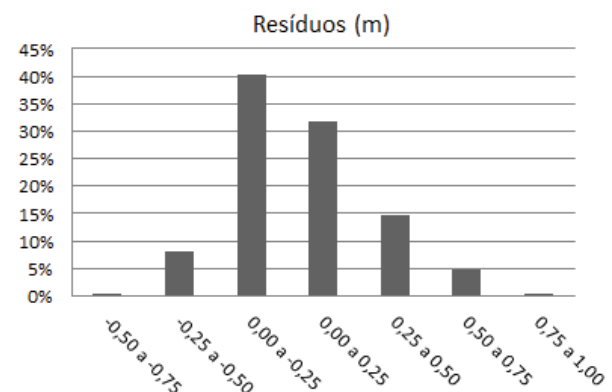


Fig. 8 - Variação dos resíduos dos pontos identificados em 8 perfis e calculados pela diferença entre os MDSs analisados.

Tabela 3: Análise de precisão do MDS gerado utilizando dados do processamento fotogramétrico, tomando como referência dados LiDAR

Perfil	Número de pontos	EQM_z	P_z
1	992	0,223	0,437
2	518	0,199	0,391
4	130	0,166	0,326
5	341	0,211	0,413
6	402	0,398	0,779
7	586	0,114	0,224
8	232	0,265	0,519
9	208	0,289	0,565
01 a 09	3409	0,238	0,467

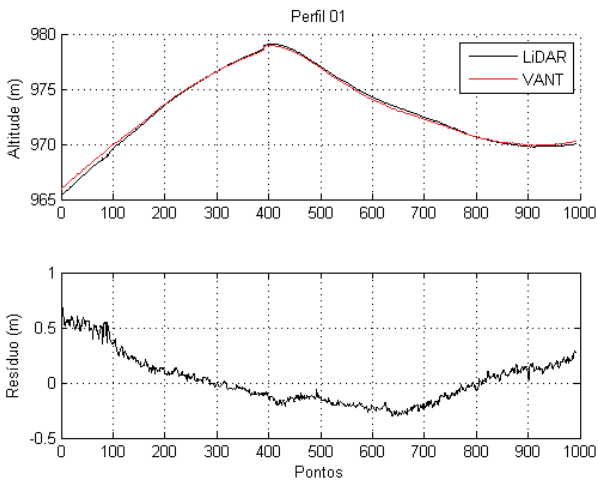


Fig. 9 - Perfil 01 e resíduo calculado pela diferença entre MDS calculados por dados VANT e dados LiDAR.

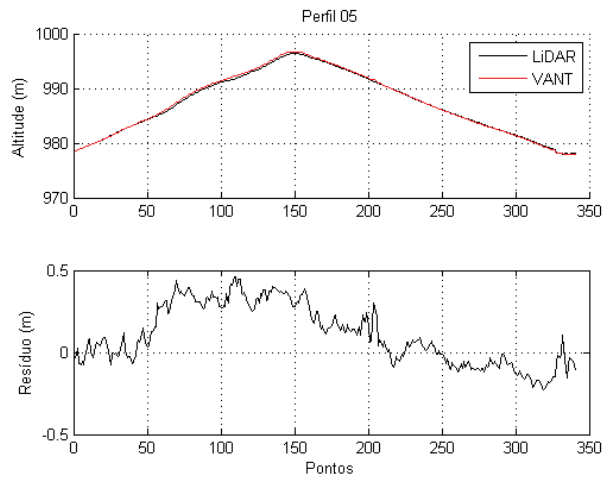


Fig. 12 - Perfil 05 e resíduo calculado pela diferença entre MDS calculados por dados VANT e dados LiDAR.

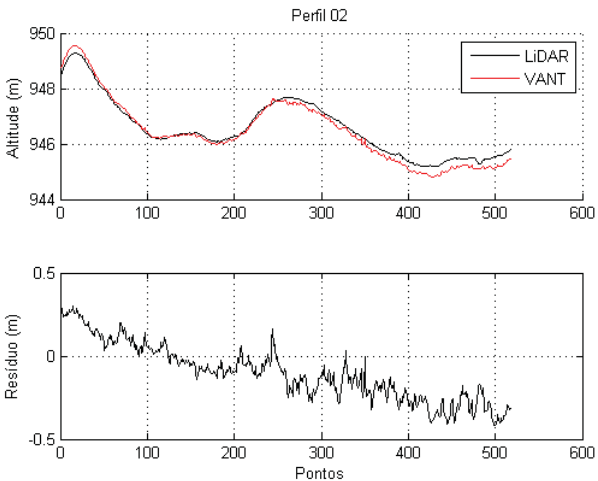


Fig. 10 - Perfil 02 e resíduo calculado pela diferença entre MDS calculados por dados VANT e dados LiDAR.

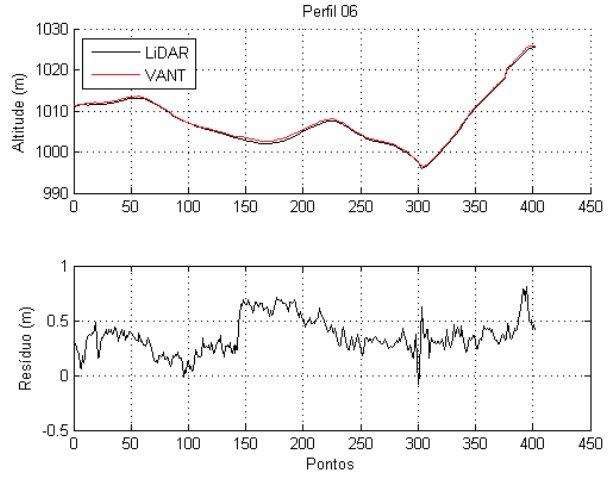


Fig. 13 - Perfil 06 e resíduo calculado pela diferença entre MDS calculados por dados VANT e dados LiDAR.

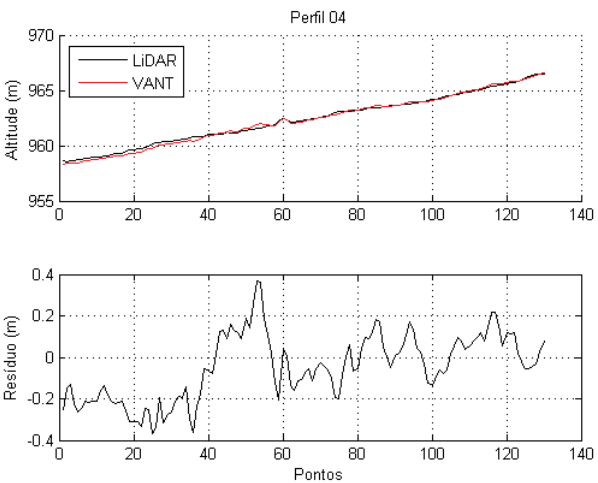


Fig. 11 - Perfil 04 e resíduo calculado pela diferença entre MDS calculados por dados VANT e dados LiDAR.

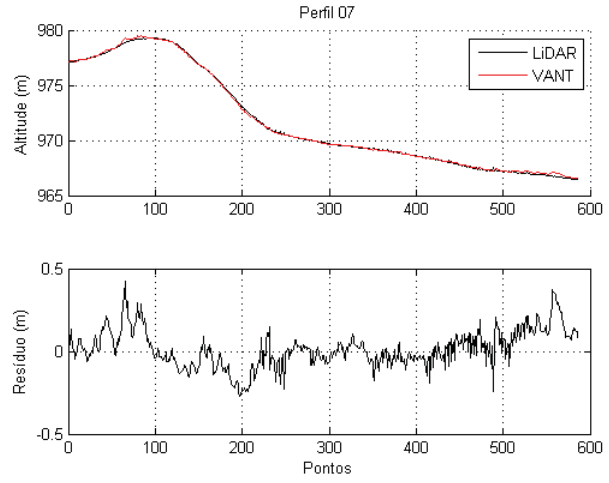


Fig. 14 - Perfil 07 e resíduo calculado pela diferença entre MDS calculados por dados VANT e dados LiDAR.

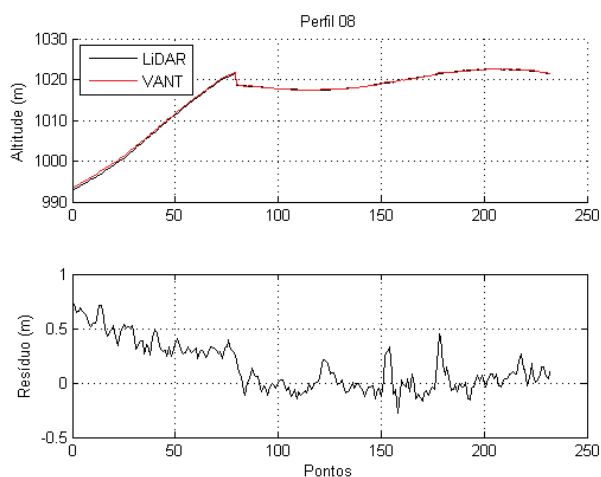


Fig. 15 - Perfil 08 e resíduo calculado pela diferença entre MDS calculados por dados VANT e dados LiDAR.

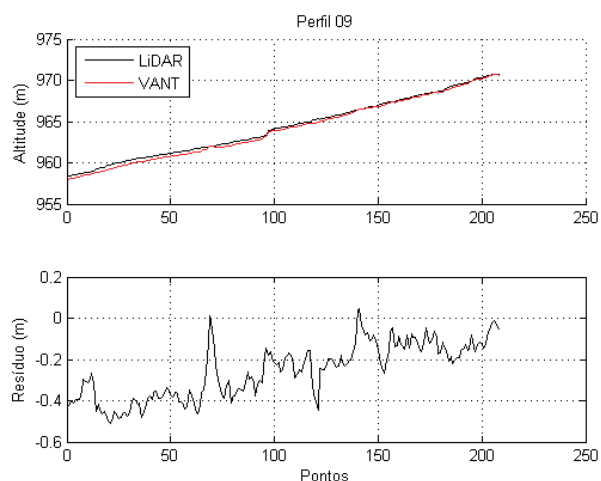


Fig. 16 - Perfil 09 e resíduo calculado pela diferença entre MDS calculados por dados VANT e dados LiDAR.

Nota-se na Tabela 3 e Fig.13 que o perfil 6 apresentaram os maiores resíduos e, conseqüentemente, as menores precisões altimétricas. Após verificação do referido perfil, foi observado que os maiores resíduos estão relacionados à presença de vegetação rasteira. Isto proporciona influência direta nos resultados por causa das diferentes características dos sensores (ativo e passivo), na aquisição de informações de terreno, onde o sistema LiDAR possui maior penetração na vegetação.

É possível identificar, no perfil 6, a influência da vegetação rasteira citada (Fig. 13), que propiciam resíduos positivos cuja média é de 0,365 m. Parte da vegetação, próxima ao perfil analisado, propiciam também o efeito de sombra,

conforme descrito por Aber *et al.* (2010), que contribuiu para a suavização do MDS gerado pelo processamento fotogramétrico e pelo resíduo apresentado.

Ao retirar o perfil citado da análise, pela presença de vegetação rasteira, o e total foi de 0,208 m e 0,407 m, respectivamente.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resíduos e precisões mostrados, considerando as configurações de obtenção de dados dos aerolevantamentos, sugere-se que o microVANT e a câmara de pequeno formato utilizados neste trabalho possibilitam a geração de MDS compatíveis com os gerados por processamento LiDAR. Isto pode ser observado no cálculo da precisão resultante do processamento de dados dos aerolevantamentos realizados e na análise de precisão do MDS gerado utilizando dados do processamento fotogramétrico, tomando como referência dados LiDAR.

As principais divergências entre os MDS gerados encontram-se no processo de aquisição dos dados, explicado pelas características dos sensores (passivo e ativo) utilizados, e nas variações temporais do ambiente, explicado pela alta resolução espacial dos dados analisados e a conseqüente sensibilidade dos MDS em considerar as pequenas variações de altitude. Isto pode ser verificado nas amplitudes máximas e mínimas dos resíduos.

Na análise da qualidade posicional das medições fotogramétricas realizadas, envolvendo o cálculo de σ e σ_{rel} , verifica-se que os valores apresentados estão próximos à resolução espacial do MDE gerado, o que indica a viabilidade do emprego do microVANT e da câmara de pequeno formato utilizados nesta pesquisa para tal finalidade.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento à empresa TerraSense, pelo fornecimento do software *PhotoScan Professional* e dos dados do microVANT e câmara de pequeno formato. À empresa Topocart Topografia Engenharia e Aerolevantamentos S/S Ltda, pelo fornecimento dos dados do sistema LiDAR. Ao IBGE pelo fornecimento dos dados da RBMC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABER, J. S.; MARZOLFF, I.; RIES, J. **Small-format aerial photography: Principles, techniques and geoscience applications**. Amsterdam, Elsevier, 2010. 266p.
- BENDEA, H. F.; CHIABRANDO, F.; TONOLO, F. G.; MARENCHINO, D. Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV the Augusta Bagiennorum Test site, In: XXI International Symposium, Athens, Greece. 2007. **Anais**. 2007
- COLOMINA, P. M., Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 92, p. 79–97, 2014.
- GREENWALT, C. R.; SCHULTZ, M. E. **Principles of Error Theory and Cartographic Applications**. ACIC Technical Report No. 96, Aeronautical Chart and Information Center, U. S. Air Force, St. Louis, Mo., 89 p., 1968.
- GONÇAVES, J. A.; HENRIQUES R. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 104, p. 101–111, 2015.
- HAARBRINK, R. B.; EISENBEISS, H. Accurate DSM production from unmanned helicopter systems. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China. 2008. **Anais**. v. XXXVII Part B1, p. 1259 – 1264, 2011.
- HERNANDEZ, J. F., AGUILERA, D. G.; GONZALVEZ P. R.; TABOADA, J. M. Image-based modelling from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry: an effective, low-cost tool for archaeological application. **Archaeometry**. V. 57, n. 1 p. 128–145, 2015.
- HORCHER, A.; VISSER, R. J. M. Unmanned Aerial Vehicles: Applications for Natural Resource Management and Monitoring. In: Council on Forest Engineering Annual Meeting, Hot Springs (AR), USA. 2004. **Anais**. 2004.
- MATOS, A. C. O. C. **Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de geodésia física na América do Sul**. Tese de Doutorado. EPUSP, Universidade de São Paulo, 2005.
- MAROTTA, G. S.; FERREIRA, A. M. R.; ROIG, H. L.; ALMEIDA, T. Avaliação geométrica de câmara de pequeno formato transportada por veículo aéreo não tripulado para uso em aerolevantamentos. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n. 3, p. 591-601, 2015.
- MAUNE, D. F. Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual. **ASPRS (The Imaging & Geospatial Information Society)**, 539 p., 2001.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**, UNESP, 2008, 476p.
- OLIVEIRA, R. A.; TOMMASELLI, A. M. G. Avaliação de uma técnica para geração de modelos digitais de superfície utilizando múltiplas imagens. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, no 2, p.257-278, 2014.
- PREOSCK, R. E. **Otimização da Restituição Fotogramétrica Digital Urbana: Relação Escala da Fotografia e a Resolução Geométrica da Imagem**. Dissertação de Mestrado. CPGCG, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 134p., 2006.
- REIDELSTUERZ, P.; LINK, J.; GRAEFF, S.; CLAUPEIN, W. UAV (unmanned aerial vehicles) für Präzisionslandwirtschaft. 13 Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft & 4 Workshop Precision Farming, In: Bornimer Agrartechnische Berichte. **Anais**. 61, 75-84. 2007.
- REMONDINO, F.; BARAZZETTI, L.; NEX, F.; SCAIONI, M.; SARAZZI, D.. UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling—current status and future perspectives. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Zurich, Switzerland, 2011. **Anais**. v. XXXVIII-1/C22, p. 25 – 31, 2011.
- ROCK, G.; RIES, J. B.; UDELHOVEN, T. Sensitivity Analysis of UAV-Photogrammetry for Creating Digital Elevation Models (DEM). In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Zurich, Switzerland, 2011. **Anais**. v. XXXVIII-1/C22, p. 70 – 73, 2011.
- ROIG, H. L.; FERREIRA, A. M. R.; MENEZES,

- P. H. B. J.; MAROTTA, G. S. Utilização de aeronaves remotamente pilotadas para extração de mosaico georreferenciado multiespectral e modelo digital de elevação de altíssima resolução espacial. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, 2013. **Anais**. 2013.
- SAUERBIER, M.; SIEGRIST, E.; EISENBEISS, H.; DEMIR, N. The practical application of UAV-based photogrammetry under economic aspects. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Zurich, Switzerland, 2011. **Anais**. v. XXXVIII-1/C22, p. 45 - 50, 2011.
- SIBSON, R. A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation. **Interpolating multivariate data**, John Wiley & Sons, New York, p. 21-36, 1981.
- STEFANIK, K. V.; GASSAWAY, J. C.; KOCHERSBERGER, K.; ABBOTT, A. L. UAV-Based Stereo Vision for Rapid Aerial Terrain Mapping. **GIScience & Remote Sensing**, v. 48, n. 1, p. 24-49, 2011.
- SONA, G.; PINTO, L. PAGLIARI, D.; PASSONI, D. GINI, R. Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images. **Earth Science Informatics**, v. 7, p. 97–107, 2014.
- SUGIURA, R., NOGUCHI, N.; ISHII, K. Remote-sensing Technology for Vegetation Monitoring using an Unmanned Helicopter. **Biosystems Engineering**, v. 90, n. 4, p. 369–379, 2005.
- VALLET, J.; PANISSOD, F.; STRECHA, C.; TRACOL, M. Photogrammetric performance of an ultra-light weight swinglet “UAV”. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Zurich, Switzerland, 2011. **Anais**. v. XXXVIII-1/C22, p. 253 – 258, 2011.
- ZHOU, G.; LI, C.; CHENG, P. Unmanned aerial vehicle (UAV) real-time video registration for forest fire monitoring. In: **IEEE International, Geoscience and Remote Sensing Symposium**, p. 1803-1806, 2005.
- WACKROW, R.; CHANDLER, J. H.; BRYAN, P. Geometric consistency and stability of consumer-grade digital cameras for accurate spatial measurement. **Photogrammetric Record**, USA, v. 22, n. 118, p. 121-134, 2007.