

GERAÇÃO DE MODELO DIGITAL DE TERRENO POR RESTITUIÇÃO AEROFOTOGRAMÉTRICA COM APOIO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO DE PEQUENO PORTE: ESTUDO DE CASO NA PEDREIRA DA EMPRESA INCOPEL - ESTÂNCIA VELHA / RS

Marciano Carneiro ¹

Rute Henrique da Silva Ferreira ¹

Telmo Fernando Perez de Quadros ²

Rubens Müller Kautzmann ^{1,2}

Resumo

O interesse em veículos aéreos não tripulados (VANT) tem crescido rapidamente. Os avanços recentes na tecnologia computacional, desenvolvimento de *software* e sensores sofisticados são os principais motivos do aumento desta tecnologia. Atualmente, o Brasil e outros países trabalham para o desenvolvimento de VANT em diferentes mercados, destacando-se a agricultura de precisão e o mapeamento urbano. O objetivo desta pesquisa é estudar a viabilidade técnica do uso de dados planialtimétricos obtidos a partir de fotografias aéreas digitais tomadas por câmeras a bordo de pequenos VANTs para a geração de modelo digital do terreno (MDT) que seja capaz de dar suporte para o cálculo de volume em cavas de minas. O experimento foi realizado na pedreira da INCOPEL, em Estância Velha, onde foram instalados alvos de controle para a restituição aérea da imagem e alvos amostrais nas sete bancadas da pedreira. Estudos comparativos foram realizados comparando as elevações ortométricas medidas com a técnica GNSS RTK com as medidas no *Photogrammetry Software PhotoScan*. Também foi avaliada a correlação entre as variáveis experimentais. Constatou-se que a escala encontrada no experimento satisfaz a norma da Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR), no que diz respeito às especificações técnicas de dados geoespaciais vetoriais e atende a finalidade de cálculo de volumes em cavas de minas.

Palavras-chave: VANT; Sensoriamento remoto; Avaliação de impactos ambientais; Geodésia.

GENERATION OF DIGITAL MODEL OF LAND BY AEROPHOTOGRAMETRIC RESTITUTION WITH SUPPORT OF SMALL PORTIE AIRCRAFT VEHICLE: CASE STUDY IN INCOPEL QUARRY - ESTÂNCIA VELHA / RS

Abstract

The interest in Unmanned Aerial Vehicle (UAV) has been increased very fast. Recent advances in computer technology, software and sophisticated sensors are the main reasons for the increase of this technology. Nowadays, Brazil and other countries work for the development of UAV in different markets, highlighting the precision agriculture and urban mapping. The objective of the this research is to study the technical feasibility of the use of planialtimetric data obtained from digital aerial photographs taken by on board cameras in small UAV for the generation of digital terrain model (DTM) that it is able to give support for the calculation of volume in mine caves. The experiment was done at INCOPEL quarry, in Estância Velha, where it was installed control targets for aerial restitution of the picture and sample targets on the seven workbenches of the quarry. Thus, comparative studies were done between orthometric elevations measured with GNSS RTK technique and the ones that were measured in the Photogrammetry Software PhotoScan. It was also checked the correlation between the experiment variables. It was found that the scale found in the experiment satisfies the National Commission of Cartography (CONCAR) standard, regarding the technical specifications of vector geospatial data and serves the purpose of calculating volumes in open-pit mine.

Keywords: UAV; Remote sensing; Environmental impact assessment; Geodesy.

¹ Centro Universitário La Salle – UNILASALLE, Canoas, RS, Brasil. E-mail: rute.ferreira@unilasalle.edu.br.

² Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, Porto Alegre, RS, Brasil.



2176-1523 © 2017 Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Publicado pela ABM. Este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da licença Creative Commons CC BY-NC-ND (Attribution-NonCommercial-NoDerivs) - <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

1. INTRODUÇÃO

O interesse por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) tem crescido rapidamente. A aerofotogrametria realizada a partir de sensores (especialmente câmeras digitais) colocados a bordo de VANTs, utilizada inicialmente para fins militares, está consolidada para a agricultura de precisão, monitoramento de impactos ambientais, cadastro urbano, sensoriamento remoto, mapeamento de áreas, como o de cavas de minas [1]. O crescimento do uso desta tecnologia se deve a fatores como capacidade de sobrevoar áreas de difícil acesso ou hostis, baixo custo e facilidade de operação, baixo risco de acidentes envolvendo pessoas e utilização em espaços reduzidos com baixa altitude de vôo (grandes escalas). Tais qualidades tornam esta tecnologia atrativa para ser utilizada em áreas de mineração (objeto deste trabalho), onde há cada vez mais preocupações com a segurança do operador do instrumento topográfico e do pessoal auxiliar. Além disso, a utilização de VANTs pode auxiliar nos trabalhos de fiscalização de minas e de barragens. Neste último caso, permite, por exemplo, o imageamento da estrutura da barragem e a geração de mapas de inundação, visando à definição de áreas a serem atingidas em caso de rompimento de barragens. O mapeamento realizado com VANTs na mineração concentra-se na fotogrametria, seja ela de médio, pequeno ou, mais frequente, a de micro levantamentos. A utilização de topografia convencional, imagens de satélites e aerolevantamentos realizados com sensores de grande porte implicam custo elevado dos produtos finais, além de necessitar condições climáticas favoráveis em um longo período de tempo.

O baixo peso dos VANTs traz a preocupação com a estabilidade dos mesmos, especialmente nas decolagens e no enfrentamento de turbulências. Esta estabilidade também é importante no aspecto da qualidade geométrica das aerofotos feitas a partir de câmeras a bordo deles. Alguns trabalhos de pesquisa têm sido direcionados aos aspectos de segurança e estabilidade, como pode ser visto em trabalhos de obtenção de dados dendrométricos de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage nos estudos de Slompo [2] e uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão nos estudos de Jorge [1].

A pesquisa realizada se insere no campo da aerofotogrametria. Segundo Brito e Coelho [3] entre os vários objetivos da fotogrametria, um dos principais é a redução do trabalho de campo no levantamento de coordenadas de um ou vários objetos e o tempo de obtenção de tais informações.

O presente trabalho estuda a viabilidade técnica do emprego de dados planialtimétricos resultantes de restituição de aerofotos digitais geradas em câmeras a bordo de VANT de pequeno porte, para geração de modelo digital de terreno (MDT) capaz de dar suporte ao cálculo de volumes em cavas de minas.

Quando se trata de imagens aéreas da superfície terrestre por meio de sensores digitais aerotransportados,

o detalhe mais importante para a definição da precisão e acurácia com que se necessita obter o produto cartográfico não é a escala da foto e a altitude de voo, como no caso de câmeras aéreas convencionais, e sim o tamanho ou resolução espacial do pixel no terreno [3]. Esse parâmetro também é conhecido como GSD (*Ground Sample Distance*) e está para a fotogrametria digital como a escala do voo, calculada como a razão entre a distância focal e a altura de vôo, está para a fotogrametria convencional.

Uma preocupação ao realizar trabalhos com o uso da fotogrametria é a sua acurácia. Segundo a Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR), para que um produto digital possa ser aceito como produto de referência do Sistema Cartográfico Nacional (SCN), e consequentemente para a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), a exemplo do previsto para o indicador estatístico de qualidade posicional, denominado Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) para produtos impressos em papel, noventa por cento dos erros dos pontos coletados no produto cartográfico/topográfico (ortoimagem), quando comparados com as suas coordenadas homólogas levantadas em campo por método de alta precisão, devem apresentar valores iguais ou inferiores aos previstos no Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Também devem apresentar valores de erro médio quadrático (EMQ) ou erro padrão (EP) iguais ou inferiores aos previstos, conforme indicados nas Tabelas 1, 2 e 3.

Na Tabela 1, o PEC-PCD Planimétrico e o EP das classes “B”, “C” e “D” correspondem, nessa ordem, as classes “A”, “B”, “C” do PEC Planimétrico previstas no Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984.

A Tabela 2 estabelece o PEC-PCD para os Modelos Digitais de Terreno (MDT), de Elevação (MDE) e de Superfície (MDS) e para os Pontos Cotados. Os valores previstos para a classe “A” (PEC-PCD) foram definidos a partir de adaptações dos estudos realizados por Merchant (1982) e ASPRS (1989), nos quais o $PEC-PCD = 0,27 * \text{Equidistância do produto cartográfico}$ e o $EP = 1/6 * \text{Equidistância do produto cartográfico}$. As classes “B”, “C” e “D” do PEC-PCD correspondem, em ordem, as classes “A”, “B”, “C” do PEC Altimétrico previstas no Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984.

A Tabela 3, o PEC-PCD Altimétrico e o EP das classes “A”, “B” e “C” correspondem, respectivamente, às classes “A”, “B” e “C” do PEC Altimétrico previstas no Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984.

Segundo Silva [5], um MDT ou MNT (Modelo Numérico de Terreno) pode ser definido como uma representação matemática computacional que descreve a superfície. As funções matemáticas empregadas são denominadas interpolações, e a superfície a ser apresentada é a superfície modelada. No caso deste estudo, foram gerados três MDTs.

Em superfícies tridimensionais, a modelagem consiste em determinar a superfície que descreve o comportamento de um conjunto de pontos definidos por suas coordenadas (X, Y, H). As coordenadas (X, Y) são as variáveis independentes

Tabela 1. PEC-PCD Planimétrico [4]

PEC ⁽¹⁾	PEC-PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
-	A ⁽²⁾	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70	7,00	4,25	14,00	8,51	28,00	17,02	70,00	42,55
A	B ⁽¹⁾	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00	12,50	7,50	25,00	15,00	50,00	30,00	125,00	75,00
B	C ⁽¹⁾	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00	20,00	12,50	40,00	25,00	80,00	50,00	200,00	125,00
C	D ⁽¹⁾	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	25,00	15,00	50,00	30,00	100,00	60,00	250,00	150,00

Tabela 2. PEC-PCD para os Modelos Digitais de Terreno (MDT), de Elevação (MDE) e de Superfície (MDS) [4]

PEC-PCD ⁽³⁾		1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		(Eqd = 1 m)		(Eqd = 1 m)		(Eqd = 2 m)		(Eqd = 5 m)		(Eqd = 10 m)		(Eqd = 20 m)		(Eqd = 50 m)		(Eqd = 100 m)	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A		0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84	2,70	1,67	5,50	3,33	13,70	8,33	27,00	16,67
B		0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,66	25,00	16,66	50,00	33,33
C		0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
D		0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00

Tabela 3. PEC-PCD Altimétrico [4]

PEC ⁽¹⁾	PEC-PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		(Eqd = 1 m)		(Eqd = 1 m)		(Eqd = 2 m)		(Eqd = 5 m)		(Eqd = 10 m)		(Eqd = 20 m)		(Eqd = 50 m)		(Eqd = 100 m)	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	A	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,67	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,67	25,00	16,67	50,00	33,33
B	B	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
C	C	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00
	D ⁽⁴⁾	1,00	0,60	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	20,00	12,00	50,00	30,00	100,00	60,00

e (H) a variável dependente, de forma que: $H = f(X, Y)$. O valor da variável (H) pode ser calculado para quaisquer valores de (X, Y) pertencentes ao domínio da função. Para o caso de um modelo numérico de terreno, as funções de interpolação são usadas para determinar a altitude (H_p) de um ponto (P) qualquer, a partir de valores conhecidos das altitudes (H_i) de seus vizinhos.

Neste trabalho foi utilizado o SIFT, que é um algoritmo de visão computacional [6], capaz de transformar uma imagem em uma coleção de vetores de características locais. O SIFT é composto por duas partes distintas: o detector e o descritor. O detector SIFT é baseado em cálculos de diferença de Gaussianas e o descritor SIFT utiliza histogramas de gradientes orientados para descrever a vizinhança local dos pontos de interesse. Mikolajczyk e Schmid [7] afirmam que o SIFT apresenta um desempenho superior em relação aos demais algoritmos estudados por eles em termos de invariância. Já Bauer [8] em seu artigo comparativo entre os algoritmos e suas variações, descreve aspectos positivos e negativos referente aos SIFT em relação SURF (*Speeded Up Robust Features*).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado na pedreira da empresa INCOPEL, localizada no município de Estância Velha, estado do Rio Grande do Sul. A área situa-se a aproximadamente 50 km da capital do estado, Porto Alegre, e tem como acesso principal a Rodovia BR-116, km 232. As coordenadas do centro geométrico da área (Sistema de Referência SIRGAS 2000) são as seguintes: 23°37'51.07"S e 51°08'48.46"O, altitude ortométrica média de 138m e área aproximada de 12 ha.

O trabalho de obtenção de imagens foi realizado em janeiro de 2016 e dividido em duas etapas: o estabelecimento de Pontos de Controle (alvos na cor preta) e de Pontos Amostrais (alvos na cor vermelha) e o levantamento aerofotogramétrico (três voos).

A principal fonte de controle geométrico em fotogrametria são os pontos de controle destinados à amarração das aerofotos. Eles são essenciais para aerotriangulação para orientações das imagens. Como pontos de controle, foram utilizadas 9 placas de polietileno na cor branca, com um alvo central marcado na cor preta nas dimensões de 0,9m x 0,9m. Os alvos foram distribuídos nas 7 bancadas

da pedreira em variadas altitudes. Após a instalação dos alvos, os mesmos foram levantados, utilizando-se a técnica RTK a partir de um conjunto GNSS-RTK da marca *South* composto de receptores base e móvel de dupla frequência modelo S86S com precisão nominal horizontal e vertical, respectivamente, de $\pm 8\text{mm}$ e $\pm 15\text{mm}$, *link* de rádio base-móvel e demais acessórios. Os pontos amostrais foram utilizados como referência altimétrica para comparar com os modelos gerados na aerofotogrametria. As placas foram confeccionadas, nas dimensões 0,90m x 0,90m, com o material de polietileno na cor branca, com um alvo central marcado na cor vermelha.

Na pesquisa de campo foi utilizado o quadricóptero do modelo da DJI *Phantom Pro*, com as seguintes características: a) Sistema a FPV embutido, que transfere vídeo no seu *smartphone* (iOS / Android) através de Wi-Fi (300m); b) Extensor Wi-Fi incluído, capaz de capturar até 980 pés acima; c) Gimbal motorizado, que controla o ângulo de inclinação da câmera e é manualmente controlável através do aplicativo Vision; d) Tempo de voo de aproximadamente 25 minutos com uma única carga, usando a bateria LiPo 4S 4.480 mAh; e) Receptor GNSS (GPS + GLONASS); f) Peso (incluindo a bateria) de 1.280g.

O plano de voo foi realizado no software *Pix4D Capture*, instalado em um *smartphone* com plataforma Android, utilizando como base os parâmetros do *Phantom Pro* e capaz de realizar voos autônomos remotamente controlados por meio do sistema de rádio e de rede Wifi própria.

Com base nas dimensões da área a serem levantadas, foram geradas automaticamente 9 faixas de voo, considerando 85% para sobreposição longitudinal e 60% para sobreposição lateral, conforme recomendações do fabricante do VANT para garantir a adequada sobreposição das imagens e, consequentemente, a qualidade do trabalho.

Foram realizados 3 voos com características idênticas: Altura do voo: 80m; Tempo aproximado de cada voo: 15 minutos; Número de faixas de voo: 9.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a prática das tomadas das aero imagens em campo, deu-se início ao processamento de dados e posteriormente foram gerados os MDTs. Os dados brutos da base foram submetidos ao serviço de Posicionamento por Ponto Preciso do IBGE. Em seguida, os pontos foram reprocessados com as novas coordenadas, possibilitando a montagem dos mosaicos das nove faixas e do fotoíndice.

O transporte de coordenadas da base do receptor GNSS foi realizado no IBGE-PPP que pode ser encontrado no site do IBGE. Este serviço de processamento é *on-line* para pós-processar dados GNSS, a um nível de confiança de 95%, que permite aos usuários obterem coordenadas precisas no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000).

Após a realização do transporte de coordenadas, os pontos coletados em tempo real foram reprocessados no software *FieldGenius*, versão 8, utilizando a coordenada horizontal e a altitude ortométrica do relatório do PPP.

A Tabela 4 mostra os pontos de controle, desvios padrões (Sigma), calculados para cada eixo (N, E, Z) e resultados dos dados GNSS e a Tabela 5 mostra os pontos amostrais, desvios padrões, calculados para cada eixo (N, E, Z) e resultados dos dados GNSS.

As Tabelas 6, 7, 8 e 9 mostram os dados de coordenadas posicionais obtidos nos três levantamentos realizados, os respectivos MDTs, e os erros relacionados aos pontos amostrais de campo.

Conforme mencionado na introdução, para que um produto digital possa ser aceito como produto de Referência do Sistema Cartográfico Nacional (SCN) e, consequentemente, para a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), é importante analisar os valores calculados do erro médio quadrático EMQxy e o EMQz dos pontos amostrais.

Para atender a PEC – PCD de forma fidedigna, foram calculados o EMQxy e EMQz dos três levantamentos, utilizando os pontos amostrais (alvos vermelhos). Analisando o EMQxy e o EMQz dos três voos (relatório do *Photoscan*), a partir

Tabela 4. Coordenadas dos pontos de controle

Ponto	SIRGAS 2000 Norte (m)	Sigma (m)	SIRGAS 2000 Este (m)	Sigma (m)	Altura Ortométrica (m)	Altura Elipsoidal (m)	Sigma (m)
BASE	6722127,791	0,0020	485643,872	0,0080	105,970	110,88	0,0160
P1	6722149,243	0,0010	485645,146	0,0017	105,870	111,780	0,0030
P2	6722259,545	0,0041	485728,085	0,0066	127,589	133,499	0,0142
P3	6722227,61	0,0022	485790,699	0,0030	139,950	145,860	0,0067
P4	6722147,733	0,0024	485884,148	0,0033	138,926	144,836	0,0081
P5	6722197,279	0,0023	485856,422	0,0029	147,074	152,984	0,0076
P6	6722223,704	0,0020	485872,656	0,0024	160,901	166,811	0,0072
P7	6722282,11	0,0039	485809,908	0,0046	165,682	171,592	0,0137
P8	6722079,44	0,0012	485734,311	0,0013	78,109	84,019	0,0053
P9	6722168,038	0,0016	485827,052	0,0018	129,271	135,181	0,0077

Tabela 5. Coordenadas dos pontos amostrais

Ponto	SIRGAS 2000 Norte (m)	Sigma (m)	SIRGAS 2000 Este (m)	Sigma (m)	Altura Ortométrica (m)	Altura Elipsoidal (m)	Sigma (m)
BASE	6722127,791	0,0020	485643,872	0,0080	105,97	110,880	0,0160
V1	6722072,059	0,0024	485669,762	0,0027	78,133	84,0430	0,0112
V2	6722141,137	0,0011	485703,142	0,0019	105,23	111,140	0,0034
V3	6722182,573	0,0016	485751,876	0,0026	116,369	122,279	0,0047
V4	6722210,184	0,0024	485784,138	0,0037	128,629	134,539	0,0081
V5	6722221,874	0,0030	485799,873	0,0042	139,561	145,471	0,0103
V6	6722239,427	0,0024	485819,414	0,0030	150,511	156,421	0,0076
V7	6722252,943	0,0128	485837,972	0,0150	162,405	168,315	0,0460

Tabela 6. Erro Médio Quadrático Planimétrico calculados para o MDT1

Ponto	Este (m)	Sigma (m)	Norte (m)	Sigma (m)
V1	485669,931	-0,169	6722072,008	0,051
V2	485703,208	-0,066	6722141,144	-0,007
V3	485751,919	-0,043	6722182,647	-0,074
V4	485784,188	-0,050	6722210,206	-0,022
V5	485799,936	-0,063	6722221,859	0,015
V6	485819,409	0,005	6722239,418	0,009
V7	485837,950	0,022	6722253,013	-0,070
EMQxy = 0,078m				

Tabela 7. Erro Médio Quadrático Planimétrico calculados para o MDT2

Ponto	Este (m)	Sigma (m)	Norte (m)	Sigma (m)
V1	485670,015	-0,253	6722072,006	0,053
V2	485703,265	-0,123	6722141,158	-0,021
V3	485751,902	-0,026	6722182,703	-0,130
V4	485784,112	0,026	6722210,202	-0,018
V5	485799,940	-0,067	6722221,865	0,009
V6	485819,455	-0,041	6722239,404	0,023
V7	485838,006	-0,034	6722252,96	-0,017
EMQxy = 0,133m				

Tabela 8. Erro Médio Quadrático Planimétrico calculados para o MDT3

Ponto	Este (m)	Sigma (m)	Norte (m)	Sigma (m)
V1	485669,949	-0,187	6722072,02	0,039
V2	485703,262	-0,120	6722141,09	0,047
V3	485751,900	-0,024	6722182,731	-0,158
V4	485784,132	0,006	6722210,243	-0,059
V5	485799,927	-0,054	6722221,875	-0,001
V6	485819,415	-0,001	6722239,42	0,007
V7	485837,960	0,012	6722253,022	-0,079
EMQxy = 0,268m				

Tabela 9. Erro Médio Quadrático Altimétrico

Pontos	MDT1	MDT2	MDT3
V1	0,063	0,006	0,033
V2	-0,010	-0,024	-0,002
V3	-0,018	0,008	-0,008
V4	-0,058	-0,097	-0,053
V5	-0,002	-0,004	-0,037
V6	-0,076	-0,036	-0,055
V7	0,032	0,026	-0,024
EMQSZ	0,0456m	0,0415m	0,035m

dos dados observa-se que os mesmos ficaram bem abaixo do solicitado no PEC – PCD Planimetria (Classe A: 0,28m) e PEC – PCD Altimétrica (Classe A: 0,50m), portanto atenderiam a escala de 1/1000 categoria “A” previstas no Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984.

As imagens foram processadas, no *software Agsoft Photoscan*, que utiliza o algoritmo SIFT, e foi desenvolvido para realizar operações de fotogrametria em imagens e extração de informações. O mesmo possibilita trabalhar com imagens a partir de uma ampla variedade de fontes e formatos, controle de solo, orientação e dados GNSS. O *software Photoscan* converte imagens aéreas em mosaicos 2D e 3D georreferenciados, utilizando pontos de apoio de GCP (pontos de controle de solo) para geo-localização e estimação da elevação ortométrica dos 7 pontos amostrais. Estes dados são apresentados na Tabela 10.

Nas Tabelas 11 a 14, é possível observar as discrepâncias encontradas entre Altitudes Ortométricas GNSS x Altitudes Ortométricas medidas nos MTDs.

Para complementar o cálculo da acurácia do modelo foi realizada uma análise com base nas discrepâncias e nos fatores de correlação, de forma a permitir o enquadramento do produto final de acordo com a legislação pertinente bem como em relação às necessidades práticas dos profissionais envolvidos com cálculos de volumes em minas. Na Tabela 15, é possível observar as médias encontradas Altitude Ortométrica medidas nos 3 modelos.

Através da análise das discrepâncias encontradas nas Tabelas 11, 12 e 13, foi possível observar as diferenças entre os modelos, que variaram entre -0,076m até +0,063m no MDT1, -0,097m até +0,026m no MDT2 e o -0,055m até +0,033m

no MDT3. Pode-se perceber que as médias encontradas nos modelos, respectivamente, foram de: -0,010, -0,017 e -0,021 metros, permitindo acurácia decimétrica, com benefícios em relação aos métodos convencionais, como eficiência e, principalmente, rapidez.

Na Tabela 16, é possível observar os coeficientes de Correlação das duas variáveis, Altitude Ortométrica Digital x Acurácia dos três modelos, calculados no *software Excel* 2013. Em estatística descritiva, o coeficiente de correlação de Pearson tem como objetivo medir o grau da correlação e dar a direção entre duas variáveis de escala métrica, classificando como positiva ou negativa.

Este coeficiente, normalmente representado por p assume apenas valores entre -1 e 1.

- $p = 1$ Significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis.
- $p = -1$ Significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis – Isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui.
- $p = 0$ Significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. No entanto, pode existir uma dependência não linear.

Observando a Tabela 16, conclui-se que o grau de correlação no MDT1 é negativo fraco, já as correlações do MDT2 e MDT3, são positivas fracas, comprovando que não dependem linearmente uma da outra, ou seja, a altitude no experimento não está relacionada diretamente à acurácia altimétrica.

Tabela 10. Altitudes medidas no ortomosaico gerados no *software Photoscan*

Alvo	Altura Ortométrica (m)	Altura Ortométrica (m)	Altura Ortométrica (m)
	MDT1	MDT2	MDT3
V1	78,196	78,139	78,166
V2	105,220	105,206	105,228
V3	116,351	116,377	116,369
V4	128,571	128,532	128,576
V5	139,559	139,557	139,524
V6	150,435	150,475	150,456
V7	162,437	162,431	162,381

Tabela 11. Discrepâncias GNSS x MDT1

Alvo	Altitude Ortométrica (m)	Altitude Ortométrica (m)	Discrepância (m)
	GNSS	MDT1	
V1	78,133	78,196	+0,063
V2	105,230	105,220	-0,010
V3	116,369	116,351	-0,018
V4	128,629	128,571	-0,058
V5	139,561	139,559	-0,002
V6	150,511	150,435	-0,076
V7	162,405	162,437	+0,032

Tabela 12. Discrepâncias GNSS x MDT2

Alvo	Altitude Ortométrica (m) GNSS	Altitude Ortométrica (m) MDT2	Discrepância (m)
V1	78,133	78,139	+0,006
V2	105,230	105,206	-0,024
V3	116,369	116,377	+0,008
V4	128,629	128,532	-0,097
V5	139,561	139,557	-0,004
V6	150,511	150,475	-0,036
V7	162,405	162,431	+0,026

Tabela 13. Discrepâncias GNSS x MDT3

Alvo	Altitude Ortométrica (m) GNSS	Altitude Ortométrica (m) MDT3	Discrepância (m)
V1	78,133	78,166	+0,033
V2	105,230	105,228	-0,002
V3	116,369	116,361	-0,008
V4	128,629	128,576	-0,053
V5	139,561	139,524	-0,037
V6	150,511	150,456	-0,055
V7	162,405	162,381	-0,024

Tabela 14. Média das discrepâncias

Alvo	Discrepância (m) MDT1	Discrepância (m) MDT2	Discrepância (m) MDT3
V1	0,063	0,006	0,033
V2	-0,010	-0,024	-0,002
V3	-0,018	0,008	-0,008
V4	-0,058	-0,097	-0,053
V5	-0,002	-0,004	-0,037
V6	-0,076	-0,036	-0,055
V7	0,032	0,026	-0,024
Média	-0,010	-0,017	-0,021

Tabela 15. Médias de Altitude Ortométricas

Alvo	Altitude Ortométrica(m) MDT1	Altitude Ortométrica(m) MDT2	Altitude Ortométrica (m) MDT3	Média (m)
V1	78,196	78,139	78,166	78,167
V2	105,22	105,206	105,228	105,217
V3	116,351	116,377	116,361	116,363
V4	128,571	128,532	128,576	128,560
V5	139,559	139,557	139,524	139,547
V6	150,435	150,475	150,456	150,455
V7	162,437	162,431	162,381	162,416

Tabela 16. Coeficiente de Correlação

Modelo	Coeficiente
MDT1	-0,2787
MDT2	0,2335
MDT3	0,3403

4 CONCLUSÕES

Conforme a Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR), no que diz respeito às especificações técnicas de dados geoespaciais vetoriais, os resultados dos três

levantamentos se enquadram na escala cartográfica de 1:1000, categoria "A". Analisando EMQxy e EMQz, observou-se que 100% dos erros dos pontos coletados no produto cartográfico/topográfico (ortoimagem), quando comparados com as suas coordenadas levantadas em campo por método diferencial em tempo real, ficaram abaixo dos 0,28m, limite este solicitado pelo PEC – PCD planimetria e PEC – PCD altimetria previstos no Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984.

Para o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), a referência de precisão e acurácia nos produtos cartográficos é a do CONCAR, portanto a escala encontrada no experimento satisfaz a norma e atende a finalidade de cálculo de volumes em cavas de minas.

O vento influenciou diretamente na acurácia planialtimétrica, causando turbulência durante a tomada das imagens. Tal fator é relevante na utilização desta tecnologia, portanto para futuros trabalhos sugere-se que seja avaliada a velocidade do vento no momento da coleta.

REFERÊNCIAS

- 1 Jorge LAC. Metodologia para utilização de aeromodelos em monitoramento aéreo: análise de imagens. São Carlos: EMBRAPA Instrumentação Agropecuária; 2003. (Circular Técnica 18 de Novembro de 2003).
- 2 Slompo, PJH. Utilização de um veículo aéreo não tripulado para obtenção de dados dendrométricos de eucalyptus benthamii maiden et cambag [dissertação]. Garapuava: Universidade Estadual do Centro-Oeste; 2013.
- 3 Brito J, Coelho L. Fotogrametria Digital. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia; 2002.
- 4 Comissão Nacional de Cartografia. Especificação técnica para a aquisição de dados geoespaciais vetoriais. infraestrutura nacional de dados espaciais. 2. ed. Rio de Janeiro: Exército Brasileiro; 2011.
- 5 Silva I, Segantine PCL. Topografia para engenharia: teoria e prática de geomática. São Paulo: Campus; 2015.
- 6 Lowe DG. Distinctive Image Features from Scale Invariant. International Journal of Computer Vision. 2004;60:91-110.
- 7 Mikolajczyk K, Schmid C. Indexing based on scale invariant interest points. In: International Conference on Computer Vision; July 2001; Vancouver, Canadá. Piscataway: IEEE; 2001. p. 525-531.
- 8 Bauer J, Sünderhauf N, Protzel P. Comparing several implementations of two recently published feature detectors. IFAC Proceedings Volumes. 2007;40(15):143-148.

Recebido em: 21 Mar. 2017

Aceito em: 22 Ago. 2017