Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Avaliação da acurácia das cubagens de volumes de mineração através de levantamentos convencionais e fotogramétricos

Alexandre Felipe Bruch- Universidade Federal de Pelotas, e-mail afbruch@gmail.com (autor correspondente) Angélica Cirolini, Universidade Federal de Pelotas, e-mail: acirolini@gmail.com, Adriane Brill Thum, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, e-mail: adrianebt@unisinis.br, Marciano Carneiro- Universidade do Vale do Rio dos Sinos. E-mail: marciano.carneiro@hotmail.com

Artigo recebido em 20/08/2018 e aceito em 14/01/2019

RESUMO

A etapa de cubagem de volumes é de suma importância para a mineração, corroborando com a avaliação econômica da jazida e o planejamento da mina. Dentre os métodos de cubagem de volumes, surge como alternativa a aerofotogrametria com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). Assim, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o uso de VANT na geração de produtos cartográficos acurados e a cubagem de volumes de mineração. Para tanto, primeiramente realizou-se um levantamento topográfico com apoio geodésico e estes resultados foram comparados com um levantamento com VANT corrigido, com pontos de controle e sem pontos de controle. Os resultados foram enquadrados no Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Digitais (PEC-PCD) e verificados a sua acurácia. Com base nos levantamentos aéreos e topográficos foram elaborados Modelos Digitais de Elevação (MDE) para a cubagem dos volumes, onde o ortomosaico gerado com pontos de controle, apresentou resultados acurados com volumes próximos ao do levantamento topográfico convencional. Já o ortomosaico sem pontos de controle apresentou diferenças significativas com relação às altitudes no terreno e o volume cubado. Portanto, as cubagens de volume com VANT podem ser realizadas objetivando resultados acurados desde que o mosaico seja corrigido com pontos de controle em campo.

Palavras-Chave: VANT; Volume; MDE.

Evaluation of the accuracy of the mining volumes by means of conventional and photogrammetric surveys

ABSTRACT

The volume-tapping stage is of paramount importance for mining, corroborating with the mine's economic valuation and mine planning. Among the various volume-cubing methods, aerial photogrammetry based on Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is an affordable alternative and has been gaining space in the market. Therefore, the objective of this research was to evaluate the use of UAV in the generation of accurate cartographic products and the mining of volumes. To do so, a topographic survey with geodetic support was first performed and these results were compared with a survey with UAV corrected with control points and without control points. The results were included in the Cartographic Accuracy Standard of the Digital Products (PEC-PCD) and verified their accuracy. From the aerial and topographic surveys, Digital Elevation Models (DEM) were developed for the cubing of the volumes, where the orthomosaic generated from the UAV and corrected with control points, presented accurate results with volumes close to the conventional topographic survey. The orthomosaic without control points presented significant differences in relation to the altitudes in the terrain and the cubed volume. Therefore, this research concluded that UAV volume counts can be performed aiming at accurate results as long as the mosaic is corrected with field control points.

Keywords: VANT; Volume; MDE

Introdução

A mineração é uma atividade econômica que envolve uma série de etapas para o seu desenvolvimento. Segundo Figueiredo (2000), a mineração começa com a pesquisa e prospecção mineral, passando pela cubagem e estudo de viabilidade econômica, planejamento e desenvolvimento de acessos, exploração e por fim, para a recuperação da zona afetada.

Para a etapa de cubagem de jazidas de minas a céu aberto, diversos métodos são utilizados, como: topografia clássica, nuvem de pontos por escaneamento a laser, levantamento geodésico com GNSS e Aerolevantamentos fotogramétricos (Silva, 2015). Este último vem ganhando destaque, principalmente após o desenvolvimento de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) de baixo custo e de câmeras não métricas de baixo peso (Silva, 2015).

Os VANTs estão sendo utilizados em várias áreas, como: agricultura, meio ambiente, segurança pública, entre outros, com resultados reconhecidos em diversas pesquisas (Jannoura et al., 2015; Capolupo et al., 2015; Chianucci et al., 2016; Lizarazo et al., 2017). Na modelagem topográfica e principalmente na cubagem de volumes, no Brasil, os primeiros trabalhos foram desenvolvidos na Universidade de Brasília (UnB) em convênio com o Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM a partir de 2013 (Silva, 2015). Também importantes trabalhos voltados para a extração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) a partir de levantamentos com VANT foram desenvolvidos na Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT) e Universidade Federal de Goiás (UFG) (Alves Jr, 2015).

As pesquisas supracitadas se concentraram no desenvolvimento de equipamentos (VANT), sistemas de calibração dos parâmetros fotogramétricos e em alguns casos, na análise da precisão das coordenadas tridimensionais extraídas das imagens geradas. Os trabalhos de Ribeiro Jr. (2011), Silva (2015) e Silva et al. (2016), foram importantes por abordarem e compararem diferentes técnicas de cubagens de volumes, concentrando-se em pilhas de rejeitos, mas desconsiderando o material ainda em sítio e o já retirado.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a acurácia da cubagem de volumes de mineração por métodos de levantamento

topográficos convencionais e fotogramétricos com VANT. Este trabalho se justifica pela diminuta quantidade de trabalhos voltados para a cubagem de volumes em sítio e a avaliação da acurácia dos resultados perante os Parâmetros de Exatidão Cartográfica (PEC) estabelecidos no Brasil. Para tanto, realizou-se o levantamento topográfico com o apoio geodésico por Global Navigation Satellite System (GNSS) de uma pedreira de brita para agregado de concreto para construção civil. Também foi realizado o levantamento aerofotogramétrico com VANT multirrotor e câmera não métrica, buscando comparar os resultados e a possibilidade de seu uso para a cubagem de volumes.

Fundamentação teórica

GNSS

O termo Global Navigation Satellite System - GNSS foi cunhado na 10ª Conferência de Navegação Aérea, em substituição a generalização atribuída desde o surgimento do Navigation System With Timing And Ranging (NAVSTAR), mais conhecido como Global Positioning System (GPS) na década de 1970 (Monico, 2008). Atualmente existem quatro sistemas de navegação por satélite: o NAVSTAR-GPS, Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS), Chinas Compass Navigation Satellite System (CNSS) e o Galileu, estes dois últimos em fase final de implantação. As constelações operacionais em sua totalidade são a GPS, composta por 24 satélites, 21 operacionais e 3 ativos em estado de reserva e a GLONASS, que conta com 24 satélites operacionais (Silva, 2015).

Segundo Monico (2008), a tecnologia GNSS permite a determinação precisa de um ponto, através da medição da distância desse ponto até o conjunto de pelo menos quatro satélites. As distâncias são determinadas pela medida de tempo que o sinal de rádio emitido pelo satélite demora a ser captada pelo receptor, com precisões geradas por relógios atômicos de altíssima precisão.

No que tange a transmissão de sinais, os sistemas GPS e GLONASS geram seus sinais a partir da frequência fundamental, modulados em duas fases portadoras L1 e L2. Deve-se salientar que cada sistema emprega uma frequência para a transmissão dos sinais, o GPS

utiliza o Code Division Multiple Access (CDMA) e o GLONASS utiliza a Frequency Division Multiple Access (FDMA) (Monico, 2008).

Segundo Silva (2015), em ambos os sistemas, o sinal da portadora L1 é modulado em dois códigos, o P (precise) de uso militar e o C/A (coarse acquisition) transmitido em código aberto. A portadora L2 é apenas transmitida pelo código P. Ambas portadoras transmitem além dos códigos, as efemérides, parâmetros dos relógios e estado do sistema.

Receptores GNSS

A classificação dos receptores de sinal GNSS pode ser realizada de várias maneiras, sendo a mais utilizada, à baseada na aplicação dos dados. Sendo assim, segundo Sebem et al. (2010) e Silva (2015) temos:

- Navegação – onde as coordenadas são fornecidas em tempo real, baseados em código C/A ou P, com precisão de posicionamento padrão de 3 a 10 m. Já sem o código de degradação, resultando no posicionamento preciso de 0,3 a 1 m;
- Topográficos – se utilizam da fase portadora L1 e o código C/A. Podem obter um posicionamento preciso se o rastreamento for realizado no modo relativo, sendo os dados pós-processados, utilizando estações de referência em distâncias inferiores a 20 km;
- Geodésicos – são receptores menos afetados de interferência da ionosfera e de sinais de dupla frequência (L1 e L2), resolvendo rapidamente às ambiguidades, gerando produtos pós-processados com precisão superior a 5 mm +1 ppm, utilizando bases com distâncias superiores a 20 km.

Portanto, a utilização de receptores GNSS classificados como Geodésicos, resultam em produtos mais precisos, desde que aplicados os devidos pós-processamentos, gerando produtos que podem ser utilizados no apoio a levantamentos topográficos (Dal’Forno et al., 2009).

Posicionamento por Ponto Preciso – PPP

O Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) é um método que utiliza as observações não diferenciadas, através das efemérides precisas das órbitas dos satélites. Sendo assim, no decorrer do ajustamento, tanto os erros de relógios dos satélites, quanto ao das órbitas por

eles descritas, são considerados conhecidos (Azambuja, 2015).

Existe disponível gratuitamente uma série de serviços PPP *on line*, e em razão de sua praticidade e bons resultados, estes vem ganhando destaque na geodésia. Entre os mais difundidos temos o CSRS-PPP, disponibilizado pelo NRCan (Natural Resources Canada); GAPS (GPS Analysis and Positioning Software), da UNB (University of New Brunswick); APPS (Automatic Precise Positioning Service) do JPL (Jet Propulsion Laboratory); magicGNSS da GMV Aerospace and Defense (Almeida e Dal Poz, 2016).

No Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE-PPP, faz uso do aplicativo de processamento CSRS-PPP e disponibiliza a rotina de maneira gratuita. Segundo IBGE (2017), o PPP-IBGE permite aos usuários com receptores GPS e/ou GLONASS, obterem coordenadas de precisão no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas-SIRGAS2000.

No PPP-IBGE é possível processar os dados GNSS (GPS e/ou GLONASS) coletados por receptores de uma ou duas frequências, no modo estático ou cinemático. Para o processamento, além do arquivo das observações, que deve estar no formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format) ou HATANAKA, o serviço do PPP-IBGE utiliza as órbitas e relógios (satélites), a correção do centro de fase das antenas dos satélites e receptores, parâmetros de transformação ITRF/SIRGAS2000, modelo de carga oceânica e de velocidades, modelo de pressão, temperatura e umidade e o atual Modelo de Ondulação Geoidal – MAPGEO2015, entre outros (IBGE, 2017).

A correção das órbitas pode ser realizada utilizando-se três tipos de efemérides, disponibilizadas pelo IGA para o PPP-IBGE:

- Ultra-rápidas: disponíveis com até três horas após a observação;
- Rápidas: disponíveis com dezessete horas após a observação;
- Final: disponível aproximadamente 13 dias após a observação.

Sendo assim, sempre que possível, os dados devem ser processados no PPP-IBGE após 13 dias do rastreamento, gerando produtos com a máxima precisão possível (IBGE, 2017).

Sendo assim, a Figura 1 demonstra graficamente as etapas do PPP-IBGE, onde que primeiramente é realizado o rastreamento por

levantamento absoluto, os dados nativos são importados para o computador para serem convertidos para o formato RINEX. O usuário então envia o arquivo RINEX pela rede mundial de computadores - INTERNET para o servidor do IBGE que os processa pelo CSRS-PPP e devolve o arquivo com as coordenadas finais para o usuário.

Figura 1. Etapas do PPP-IBGE

Veículos Aéreos Não Tripulados - VANT

Os VANTs têm sua origem e desenvolvimento atrelados ao uso militar. O primeiro VANT remonta ao século 19, quando os austríacos utilizavam balões carregados com explosivos para atacar alvos inimigos (Munaretto, 2017). Já o primeiro VANT controlado remotamente foi o Firebee, apresentado em 1951, tinha como finalidade servir de alvo para o treinamento de pilotos de caça norte americanos.

Já no Brasil, o primeiro projeto 100% nacional, foi a Arara (Aeronave de Reconhecimento Autônomo e Remotamente Assistida), tendo como finalidade substituir os levantamentos aéreos agrícolas realizados com aeronaves convencionais (Alves Jr, 2015).

Para efeitos de classificação, os VANTs são enquadrados segundo vários critérios, sendo o mais usual o tipo de asa. Os de asa fixa em geral necessitam de pista de pouso e/ou decolagem, ou também podem ser lançados por catapultas e pousar por paraquedas. São VANTs que geralmente apresentam longa autonomia e voltados para o mapeamento agrícola.

Já os VANTs de asa rotativa, não necessitam de pista de pouso ou catapultas, nem de paraquedas, pois apresentam a capacidade de decolar e pousar na vertical, além de pairarem no ar através de sustentação forçada (Munaretto, 2017). A maior parte dos modelos

de asa rotativa é de quadricópteros, mas também são comuns os heptacópteros e octacópteros.

Geralmente, os VANTs de asa rotativa são utilizados para fins de mapeamento urbano, atividades de segurança e recreativo (Linhares, 2016). Segundo o autor supra citado, quem lidera a venda de VANTs no mundo é a DJI, tendo como modelo mais vendido o PHANTOM 4.

Uso de VANTs no levantamento topográfico e cubagem de volumes

O levantamento topográfico de áreas de mineração é uma etapa custosa e dependendo da morfologia do terreno e dos acessos, pode ser demorada. Objetivando a redução de custos e a diminuição no tempo de aquisição dos dados, várias empresas de mineração vêm investindo no uso de VANTs para a produção de imagens aéreas de alta precisão, as quais após serem processadas geram ortomosaicos, nuvens de pontos e modelos em três dimensões altamente precisos (Ferreira, 2017; Lizarazo et al., 2017).

Fatores que colaboram para o avanço da tecnologia VANT empregada na mineração, é o desenvolvimento de equipamentos de baixo custo e programas com interface amigável e intuitiva (Santos, 2016). Para Silva et al. (2016), a tecnologia VANT vêm crescendo em uso por produzir dados topográficos de maneira rápida e precisa, quando comparado com técnicas tradicionais como estação total e o GNSS.

Levantamentos aerofotogramétricos com VANTs realizados por Souza (2015) geraram produtos topográficos e de uso e cobertura da terra enquadradas como Classe A, segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC. Resultados semelhantes foram encontrados por Silva (2015), a qual obteve produtos precisos para escalas de até 1:400.

Na cubagem de volumes, recebe destaque os trabalhos de Silva (2015) Silva et al. (2016), Santos (2016) e Ferreira (2017). Todas as pesquisas citadas demonstraram o uso e a qualidade dos produtos gerados a partir de levantamentos fotogramétricos com VANTs, principalmente os de asa rotativa.

A vantagem dos equipamentos de asa rotativa em áreas de mineração e na cubagem de volumes, é que estes podem pairar no ar e em geral possuem mecanismos de estabilização de câmeras (Ferreira, 2017). Sendo assim, como a mineração em geral é realizada em áreas com dimensões espaciais reduzidas, os

equipamentos de asa rotativa são plenamente aplicáveis.

Avaliação da Acurácia Altimétrica de Produtos Cartográficos

No Brasil, o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), criado pelo Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, estabeleceu os critérios para a elaboração de cartas, a avaliação de sua exatidão e à distribuição de erros ao longo das mesmas. Em seu artigo 8º, inciso 1º, a norma define que a estatística de exatidão de trabalhos cartográficos deve ser enquadrada em uma probabilidade de 90%, ou seja, noventa por cento dos pontos bem definidos no produto cartográfico, quando avaliados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC. Este limiar é importante porque norteia os testes estatísticos (Santos, 2016). O PEC também disponibiliza uma classificação para as cartas, conforme sua exatidão, em A, B, C.

Com a evolução das tecnologias, principalmente com a cartografia digital, novos padrões de qualidade foram implementados pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro – DSG (2011), surgindo as Especificações Técnicas dos Produtos dos Conjuntos de Dados Geoespaciais (ET-PCDG). A ET-PCDG estabelece as tolerâncias para que um produto cartográfico digital possa ser aceito no Sistema Cartográfico Nacional (SCN), e consequentemente, para a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE). Da ET-PCDG se extrai o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), que é uma evolução da PEC de 1984 (Santos et al., 2016).

A PEC-PCD amplia as classes da PEC de 1984, sendo possível realizar o enquadramento de Modelos Digitais de Elevação (MDE), de Terreno (MDT), de Superfície (MDS) e para pontos cotados. O comparativo das classes PEC e das PEC-PCD com as tolerâncias para a avaliação da acurácia altimétrica dos pontos cotados é encontrada na Tabela 1. O Erro Padrão (EP) e o Desvio Padrão na PEC são considerados sinônimos.

Tabela 1. PEC altimétrica para Pontos Cotados, MDT, MDE e MDS em produtos cartográficos digitais.

Classe PEC	Classe PEC-PCD	PEC (m)	EP (m)
-	A	0,27	0,17

A	B	0,50	0,33
B	C	0,60	0,40
C	D	0,75	0,50

Área de estudo

A área de estudo foi escolhida a partir da geometria da jazida, visto a necessidade de limites de borda e bancada bem definidos, garantindo assim, a acurácia dos resultados. A jazida é de propriedade de uma mineradora de agregados para concreto e pavimentação de rodovias, a qual produz brita de diferentes granulometrias a partir de rochas da família dos granitoides.

A jazida está localizada no município de Pelotas/RS, em uma região conhecida como Monte Bonito – 9º distrito (Figura 2). As coordenadas no centro da jazida são 31°38'07" de latitude sul e 52°26'47" de longitude oeste e altitude média é de 133 m. O relevo predominante é de colinas e morros de topo convexo, com declividades que variam de 10 a 35% (Silva, 2009).

Figura 2. Mapa de localização da área de estudo

Materiais e métodos

Este item objetiva descrever os materiais e métodos utilizados no processo de avaliação e comparação de resultados das técnicas cubagem de reservas minerais através de levantamentos topográficos planialtimétricos convencionais e aerofotogramétricos.

Primeiramente determinaram-se as etapas de execução do levantamento e tratamento dos dados, sendo: seleção dos

equipamentos a serem utilizados em campo, levantamento de coordenadas de campo com GNSS e processamento das coordenadas através do Sistema de Posicionamento por Ponto Preciso-PPP (IBGE), levantamento topográfico planialtimétrico, voo aerofotogramétrico, processamento fotogramétrico, processamento em Sistema de Informação Geográfica – SIG.

Determinação de Coordenadas com receptor Global Navigation Satellite System (GNSS)

Buscando comparar os resultados do levantamento topográfico e os dados fotogramétricos, iniciou-se os trabalhos com o rastreamento de 2 pontos de referência materializados em campo. A materialização foi efetivada através do uso de piquetes de madeira.

Para o rastreamento e determinação das coordenadas foram utilizados dois receptores ProMark 500 GNSS L1/L2. O rastreamento foi realizado no modo estático em período superior a uma hora, com intervalos de registro de 2 segundos. O processamento foi realizado através do PPP do IBGE. O sistema de referência utilizado foi o SIRGAS 2000 e o fuso 22.

Segundo IBGE (2017), rastreios estáticos realizados com tempo superior a uma hora, em equipamentos de dupla frequência L1/L2 e utilizando as órbitas finais, terão soluções processadas empregando as constelações GPS e Glonass. Esse processamento, gera precisões planialtimétricas superiores a 4 cm (IBGE, 2017).

Levantamento Topográfico Planialtimétrico

Conforme NBR 13133/1994, quando possível, o posicionamento geográfico de uma área deve ser dado por coordenadas geodésicas, dando origem a um sistema planimétrico. Sendo assim, as coordenadas da origem do levantamento estão relacionadas ao Sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM). Segundo a norma, a curvatura terrestre e a refração atmosférica só podem ser desconsideradas se a dimensão máxima for de 80 km e as seguintes expressões forem obedecidas:

$$\Delta\alpha \text{ (mm)} = -0,004 \quad \alpha^3 \text{ (km)}$$

$$\Delta h \text{ (mm)} = +78,5 \quad \alpha^2 \text{ (km)}$$

$$\Delta h' \text{ (mm)} = +67 \quad \alpha^2 \text{ (km)}$$

Onde:

$\Delta\alpha$ = deformação planimétrica causada pela curvatura da Terra, em mm;

Δh = deformação altimétrica causada pela curvatura da Terra, em mm;

$\Delta h'$ = deformação altimétrica devida ao efeito conjunto da refração atmosférica e da curvatura terrestre, em mm.

Calculadas as distorções planialtimétricas conforme parâmetros da NBR 13133/1994, verificou-se que as distorções eram submilimétricas, podendo assim, ser criado um plano topográfico local com origens em coordenadas UTM. Este plano é perpendicular a vertical do lugar no ponto da superfície terrestre considerado como origem do levantamento (Dal'Forno et al., 2009).

Para o levantamento planialtimétrico utilizou-se uma estação total da marca FOIF, modelo OTS685 R500, com precisão angular de 5" e precisão linear com prisma de 2 mm + 2 ppm. No projeto do levantamento planialtimétrico foram inseridas as coordenadas do ponto de estação e da ré. Com o intuito de gerar uma malha densa de pontos, o intervalo entre os pontos da malha foi de aproximadamente 5 m.

Após o levantamento planialtimétrico, as coordenadas topográficas locais foram transformadas em coordenadas geodésicas através do programa TransGeoLocal, a qual emprega a equação proposta por Andrade (1998, p. 98):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda_0 & -\cos\lambda_0 & 0 \\ \cos\lambda_0 & -\sin\lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin\varphi_0 & -\cos\varphi_0 \\ 0 & \cos\varphi_0 & \sin\varphi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x-x_0 \\ y-y_0 \\ z-z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$$

Onde:

t, u e v – são coordenadas topográficas dos pontos levantados em campo;

φ_0 e λ_0 – são a latitude e a longitude geodésica do ponto determinado para a origem do sistema;

X, Y e Z – são as coordenadas geodésicas cartesianas tridimensionais transformadas do ponto;

X_0 , Y_0 e Z_0 – são as coordenadas geodésicas cartesianas tridimensionais do ponto escolhido para a origem do sistema.

Com as devidas transformações realizadas, a planilha de pontos foi importada para o Sistema de Processamento Informações Georreferenciadas – SPRING 5.5.1.

Veículo Aéreo Não Tripulado - VANT

Para esta pesquisa optou-se pelo uso de um VANT multirrotor fabricado pela DJI, modelo Phantom 4 Advanced, a qual possui as seguinte características:

- Peso em ordem de voo: 1368 gramas
- Autonomia de voo: 28 minutos
- Distância máxima de alcança de rádio transmissor: 5 km
- Bateria: LiPo4s de 5870 mAh
- Câmera: Sensor CMOS de 20 Mega pixels
- Dimensão máxima de cada foto: 5472 x 3648 pixels
- Posicionamento Espacial: GPS+GLONASS

Com o intuito de aumentar a precisão do levantamento, foi criado um plano de voo (Figura 3) através do programa gratuito DroneDeploy, com as seguintes características:

- Altitude de voo: 100 metros
- Sobreposição lateral das faixas: 60%
- Sobreposição frontal das fotos: 70%
- Azimute de voo: 85°
- Velocidade máxima: 15 m/s
- Visada da câmera: Nadir
- Resolução espacial: 3 cm/pixel
- Tempo de voo: 9 minutos e 24 segundos

Figura 3. Plano de voo da área de estudo

Após a confecção do plano de voo, foi definido o cronograma de levantamento. Considerou-se a hora com a menor inclinação solar, visando minimizar o efeito da sombra nas fotos, executando o voo às 12 horas e 30 minutos.

Pontos de Apoio (Alvos)

Para o georreferenciamento de precisão das fotos aéreas, foram utilizados 12 pontos de apoio ou controle, materializados em campo. Estes pontos, tem origem no levantamento GNSS e topográfico, sendo transformados para uma

superfície elipsoidal no programa TransGeoLocal (Tabela 2).

Tabela 2 – Coordenadas dos pontos de apoio

Marco	N (m)	E (m)	h (m)
001	362803,876	6499132,585	116,250
002	362736,014	6499103,003	116,090
003	362677,200	6499060,567	115,592
004	362644,438	6499006,984	122,815
005	362660,698	6499101,635	121,606
006	362787,875	6499210,423	130,223
007	362888,774	6499257,950	130,889
008	362826,083	6499260,673	141,062
009	362748,666	6499227,962	140,185
010	362767,492	6499264,473	152,862
011	362692,811	6499237,850	153,914
012	362731,986	6499274,252	161,038

A materialização dos pontos foi realizada através de piquetes de madeira e alvos de lona com dimensões de 50 x 50 centímetros (Figura 4). O material e a dimensão dos alvos foram escolhidos em função da resolução espacial das imagens resultantes, o que permitiu a plena identificação dos pontos para o georreferenciamento.

Figura 4. Alvos dispostos em campo

Processamento das Imagens

Na etapa de processamento das imagens aéreas, foi utilizado o programa PhotoScan Profissional desenvolvido pela empresa Agisoft, conforme proposta de Jaud et al. (2016). Este programa apresenta rotina

automática de reconhecimento de imagens capturadas por diferentes VANTs e câmeras. O programa PhotoScan permite a criação de ortomosaicos com alta resolução espacial através da técnica de mosaicagem com base nas semelhanças entre as imagens.

Primeiramente foi realizada a avaliação visual da qualidade das imagens e dos registros do intervalômetro. A próxima etapa foi à importação das imagens e o alinhamento das mesmas (Figura 5), onde o programa define os parâmetros da câmera utilizada, o Ponto Principal (pp) e a rotação das fotos. Foi verificado também se toda área havia sido imageada durante o levantamento.

Após o alinhamento das fotos, foi gerada a nuvem de pontos homólogos e construído o primeiro Modelo Digital de Elevação (MDE). Também foi gerado um ortomosaico para o conhecimento prévio da área. Para a geração destes produtos, o PhotoScan utiliza a tecnologia multiview, a qual permite processar imagens arbitrárias, com variação de sobreposição, desde que existam pontos homólogos em imagens distintas.

Apesar das imagens já possuírem um registro com as coordenadas geográficas de localização, estas foram corrigidas através de georeferenciamento com 12 pontos materializados em campo. Este processo foi realizado para aumentar a precisão do ortomosaico e transladar as imagens da superfície de referência geodésica World Geodetic System (WGS) para o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS).

De posse dos ortomosaicos bruto e o corrigido, o processo foi finalizado com a geração dos MDEs bruto e corrigido e de suas respectivas curvas de nível, com equidistâncias de 1 metro e a exportação dos MDEs no formato Tagget Image File Format (TIFF).

Figura 5. Alinhamento das fotos

Avaliação da acurácia

Para a mensuração da acurácia altimétrica dos MDEs bruto e o corrigido com pontos de apoio, é necessário avaliar os efeitos dos erros sistemáticos e aleatórios, através de testes de tendência e precisão (Santos et al., 2015). Sendo assim, foram utilizados os parâmetros estatísticos propostos por Galo e Camargo (1994), adaptados por Silva (2015), Silva et al. (2016), Santos et al. (2016) e Zanetti et al. (2016).

Primeiramente, é realizada a comparação dos valores assumidos como referência (h_r), que foram determinados com o GNSS e Estação Total e as feições determinadas no MDE (h_o), conforme equação 1. Com os mesmos dados, gera-se a estatística da média (equação 2), e o desvio padrão (equação 3), onde n é o número total de amostras.

$$\Delta h = (h_o - h_r) \quad (1)$$

$$\overline{\Delta h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h \quad (2)$$

$$S_{\Delta h} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta h - \overline{\Delta h})^2} \quad (3)$$

Para o teste de tendência são utilizadas as hipóteses $H_0: (\Delta h)^- = 0$, quando o h não é tendencioso e $H_1: \text{se } (\Delta h)^- \neq 0$, o h é tendencioso. Conhecendo as hipóteses a serem identificadas, a próxima etapa é a realização do cálculo estatístico amostral do t de Student, objetivando verificar se o resultado está no intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula (Elias et al., 2017). O valor de t é calculado conforme equação 4.

$$t_h = \frac{\overline{\Delta h}}{S_{\Delta h}} \sqrt{n} \quad (4)$$

Se o valor do teste t de Student for inferior ao valor limite tabelado $t_{n-1;\alpha/2}$, onde n é o número de pontos amostrais e atendendo a equação 5, o MDE está livre de erros sistemáticos significativos.

$$|t_{\text{calc}}| < t_{n-1;\alpha/2} \quad (5)$$

Na análise da precisão, Silva (2015), Silva et al. (2016) e Elias et al. (2017) sugerem o uso do teste Qui-quadrado e o enquadramento conforme estabelecido na Especificação Técnica da ET-PCDG e o Erro Padrão (EP) altimétrico. Para

realizar o teste Qui-quadrado primeiramente é calculado o erro padrão esperado (σ_h) exemplificado na equação 6.

$$\sigma_h = EP_{Alt} \times Eq. \text{ das curvas de nível} \quad (6)$$

A partir do σ_h aplica-se um teste de hipótese, comparando o desvio padrão das discrepâncias das alturas com o EP esperado para a classe PEC-PCD a qual deseja testar, $H_0: S_{\Delta h}^2 = \sigma_h^2$, contra $H_1: S_{\Delta h}^2 > \sigma_h^2$ (SILVA et al., 2016). O valor do teste Qui-quadrado calculado χ_h^2 conforme equação 7 deve apresentar valor inferiores ao teste Qui-quadrado tabelado $\chi_{n-1, \alpha}^2$ demonstrado na equação 8, possibilitando determinar a escala de representação a qual o MDE se enquadra dentro das classes (A,B,C,D). O tamanho da amostra é representado pelo n , o s é o desvio padrão das discrepâncias e o σ é o EP esperado para uma determinada classe PEC-PCD.

$$\chi_h^2 = (n-1) \frac{s_{\Delta h}^2}{\sigma_h^2} \quad (7)$$

$$\chi_h^2 \leq \chi_{(n-1, \alpha)}^2 \quad (8)$$

Cálculo Volumétrico

Segundo Ribeiro Jr (2011) e Cryderman et al. (2014), a técnica mais precisa de cálculo de volumes de minério é feita a partir das “primitivas”, ou seja, a superfície física original e dos dados do MDE da topografia atual. Silva et al. (2016) e Kuruppasamy et al. (2016), sugerem que em terrenos onde não se possui as primitivas, se utilize dados de base da reserva, através da delimitação de uma poligonal com pontos determinados com levantamento topográfico ou GNSS.

Sendo assim, foram utilizados pontos conhecidos para a construção de uma poligonal que serviu para o recorte dos MDEs bruto e corrigido, tanto de material extraído e de material ainda depositado. Para a interpolação estatística e construção de MDEs foi utilizado o programa Surfer 10 da Golden Software.

No Surfer 10, primeiramente foram importados os pontos do levantamento topográfico. Os pontos foram interpolados pelo método da triangulação linear, buscando preservar os valores das amostras e o limite do conjunto de dados. De posse da grade, foi realizada a cubagem dos volumes, utilizando-se uma resolução espacial de 3,5 metros e intervalos altimétricos de 1 mm.

Por fim, foi importada a imagem TIFF com a grade altimétrica gerada pelo PhotoScan.

A partir desta grade, os volumes foram calculados no Surfer 10, utilizando-se os mesmos parâmetros do levantamento topográfico.

Resultado e discussão

MDEs

Os MDEs criam, através de uma ferramenta computacional, uma representação matemática contínua da topografia do terreno, distribuída espacialmente às variações de altitude numa área baseada e definida sobre um plano cartográfico em um conjunto de coordenadas tridimensionais (X, Y e Z) (Toutin e Gray, 2000). Para esta pesquisa, gerou-se 3 MDEs, um de cada superfície avaliada, onde o MDE gerado a partir do levantamento geodésico e topográfico é considerado como o de referência para a avaliação dos outros dois produtos.

O MDE de referência foi gerado a partir dos 251 pontos levantados em campo com GNSS e Estação Total (Figura 6), em uma área de 8,917 ha, gerando uma densidade de 28,15 pontos/ha. A NBR 13.133 indica para levantamentos em terrenos com declividade média entre 10 e 20% e equidistâncias de curvas de nível de 1m, uma densidade mínima de 25 pontos por hectare, enquadrando assim o levantamento na classe III PA.

No mapa de densidade (Figura 6) observa-se os pontos concentrados na região noroeste do levantamento, isto porque, são as áreas mais inclinadas do terreno com rupturas topográficas abruptas em distâncias de bancada de até 10 metros. Essa característica do terreno conduziu o levantamento geodésico e topográfico a uma densificação nesta região, evitando que os interpoladores suavizassem a topografia.

Figura 6. Pontos do Levantamento Topográfico e GNSS

Figura 7. Densidade de pontos do levantamento topográfico e GNSS

Os resultados da grade TIN (Figura 8) são concordantes com a densificação das amostras coletadas no levantamento topográfico, uma vez que são gerados segmentos de retas que não se interceptam, onde os vértices do poliedro triangular são geralmente pontos amostrados da superfície ou limite do projeto. Sendo assim, foi gerada a TIN com o intuito de verificar a densidade de amostras e dos poliedros, sua continuidade espacial e se não existiam pontos dispersos (Scattered) (Toutin e Gray, 2000). Os 251 pontos levantados em campo, geraram 552 poliedros de faces triangulares, sendo que apenas 3 destes são Scattered, as quais foram desconsiderados através de recorte da malha. O comprimento médio das faces dos poliedros é de 9,8328 metros.

Figura 8: Grade TIN do levantamento topográfico e geodésico

Para a avaliação do MDE de referência, foi gerada uma superfície 3D (Figura 9), onde pode ser constatada a topografia suavizada do limite abrupto das bancadas da pedra. Esse problema é causado pela dificuldade em levantar pontos topográficos no limite da bancada, sendo que, as normas de segurança ditam que a distância de aproximação da ruptura topográfica em no mínimo um metro. Sendo assim, as bordas de bancada que deveriam ser representadas com uma face vertical aparecem inclinadas.

Cabe também salientar que resíduos ou rejeitos da extração mineral, deixados na base da pedra, não são representados no MDE oriundo da topografia e do GNSS. Esse fato ocorre por que o espaçamento entre pontos no levantamento é de + 5 metros e estes resíduos em geral não apresentam diâmetro superior a dois metros.

Figura 9. Superfície 3D gerada a partir do levantamento topográfico e GNSS

A densificação da malha amostral do aerolevantamento com o VANT é determinada pela altura de voo, sobreposição frontal e lateral das fotos e o nível de qualidade do

processamento das imagens. Como o aerolevanteamento é o mesmo para a geração do MDE bruto e do corrigido com os pontos de apoio, assim como a qualidade do processamento, a nuvem de pontos é idêntica no MDE bruto e no corrigido.

A nuvem de pontos dos MDEs do aerolevanteamento bruto e corrigido é composta por 1.944.427 amostras (Figura 10), gerando uma densidade de 218.058 amostras por hectare ou 21,81 pontos por m². Assim como no levantamento topográfico, a maior densidade de pontos está concentrada na região noroeste (Figura 11), onde a área apresenta maior declividade, principalmente próximo ao limite das bancadas de extração de rochas.

Figura 10. Pontos do Aerolevanteamento

Figura 11. Densidade de pontos do Aerolevanteamento

A grade TIN gerada a partir da nuvem de pontos do aerolevanteamento (Figura 12) também é concordante com a densidade de amostras. Os 1.944.427 pontos geraram

4.530.514 poliedros de faces triangulares, sendo que 371 destes são *Scattered*. Estes vértices dos poliedros externos a área do levantamento foram excluídos na modelagem através de recorte por máscara.

Como pode ser verificado na grade TIN, em alguns locais, principalmente na área noroeste do levantamento, existe uma distância maior entre os vértices dos poliedros, causado pelo efeito de sombra no aerolevanteamento. A média dos comprimentos das faces dos poliedros é de 0,2934 m.

Figura 12. Grade TIN gerada a partir do aerolevanteamento

Para a avaliação da superfície 3D originada a partir do aerolevanteamento, foi necessário realizar um modelo para a nuvem de amostras bruta e a corrigida com os pontos topográficos de campo. Isso por que, como pode ser constatado na escala vertical dos dois modelos, as altitudes foram ajustadas para os referências levantados em campo. No modelo de superfície 3D dos dados brutos (Figura 13), a altitude mínima é de 115,892 m e a máxima é de 160,337 m, gerando uma amplitude de 44,445 m.

No modelo de superfície 3D do MDE corrigido (Figura 14), a altitude mínima é de 110,033 metros e a máxima é de 162,138 metros, com amplitude de 52,105 metros. Apesar da diferença visual entre os modelos 3D bruto e corrigido não serem perceptíveis, as discrepâncias altimétricas são significativas (7,66 metros).

Já, as diferenças entre os modelos 3D do aerolevanteamento e do originado da topografia e GNSS, são ainda mais significativas, visto que a densidade de pontos é 7.746 vezes maior. Essa densidade de pontos muito superior gerada pelo aerolevanteamento

resultou na representação de elementos com diâmetros próximos a 20 cm.

Figura 13. Superfície 3D gerada a partir do Aerolevantamento bruto

Figura 14. Superfície 3D gerada a partir do Aerolevantamento corrigido

Com o intuito de resumir os resultados dos MDEs, foi elaborada a Tabela 3, onde percebe-se a significativa diferença de densidade de pontos entre o levantamento com topografia e GNSS e o com VANT. Também fica evidente a proximidade entre as amplitudes topográficas dos levantamentos topográficos e GNSS e o MDE com VANT corrigido, comparado com o MDE com VANT bruto.

Tabela 3. Comparação de resultados entre diferentes MDEs

	Topografia e GNSS	MDE VANT bruto	MDE VANT corrigido
Nuvem de Pontos	251	1.944.427	1.944.427
Densidade média de pontos (ha)	28,15	218.058	218.058
Número de faces da TIN	552	4.530.514	4.530.514
Comprimento médio das faces dos poliedros (m)	9,8328	0,2934	0,2934

Amplitude Topográfica (m)	51,915	44,445	52,105
---------------------------	--------	--------	--------

Avaliação da Acurácia

Para a avaliação da acurácia optou pela proposta de Silva (2015), também discutida em Silva et al. (2016), onde é feita a distinção entre efeitos sistemáticos e aleatórios dos erros de medições. Essa metodologia conclui que o modelo é acurado quando estatisticamente o mesmo está livre de tendências, conforme enquadramento em uma determinada escala e classe, segundo estabelecido na norma vigente PEC-PCD (Silva et al., 2016).

Portanto, para o cálculo das discrepâncias altimétricas entre os MDEs foram selecionados os 12 pontos coletados em campo com auxílio do GNSS geodésico e Estação Total e seus homólogos encontrados na nuvem de pontos bruta do VANT e da nuvem de pontos do VANT corrigida com os pontos. O resultado das discrepâncias foi obtido através da aplicação da equação 1. Também foi obtido a média e o desvio das discrepâncias através das equações 2 e 3 e os resultados apresentados na Tabela 4.

Como pode ser observado na Figura 15, a média das discrepâncias altimétricas foram sensivelmente reduzidas após as imagens do levantamento com o VANT e consequentemente a nuvem de pontos ser corrigida pelos pontos levantados em campo. A média das discrepâncias do levantamento bruto ficou em -2,159 m e a média pós correção ficou em 0,14 m.

Tabela 4. Estatística das discrepâncias

Pto	h_0 VANT bruto	h_0 VANT corrigido	h_t GNSS	Δ VANT bruto	Δ VANT corrigido
1	121,682	115,732	116,250	-5,432	0,518
2	121,958	115,746	116,090	-5,868	0,344
3	121,965	115,795	115,592	-6,373	-0,203
4	124,111	122,615	122,815	-1,296	0,200
5	121,979	121,530	121,606	-0,373	0,076
6	133,026	130,109	130,223	-2,803	0,114
7	133,554	131,778	130,889	-2,665	-0,889
8	142,401	141,295	141,062	-1,339	-0,233
9	141,668	139,853	140,185	-1,483	0,332

10	152,758	152,351	152,862	0,104	0,511
11	153,570	153,867	153,914	0,344	0,047
12	159,761	160,178	161,038	1,277	0,860
Média $\overline{\Delta h}$				-2,159	0,140
Desvio Padrão $S_{\Delta h}$				2,543	0,448

O desvio padrão seguiu a mesma tendência em função da média, sendo que as amostras da nuvem de pontos bruta apresentaram um desvio padrão de 2,543, enquanto que nos pontos da nuvem corrigida, o desvio padrão da média foi reduzido para 0,448. A diferença significativa, entre os dois desvio padrão encontrados, demonstra a importância do uso de pontos de apoio (controle) para a correção altimétrica de mosaicos fotogramétricos.

Figura 15. Gráfico das discrepâncias altimétrica

Já na avaliação das tendências, buscando estimar-se se os resultados estão dentro do intervalo de aceitação ou rejeição, foi calculado o teste t amostral (Equação 4) para os dois modelos (bruto e corrigido). O intervalo aceitável para um nível de confiança igual a 90% ($\alpha = 0,10$), ou seja, $1 - \alpha$, tendo como referência os 12 pontos levantados em campo, obtém-se o valor limite de $t_{10}(11)$ tabelado igual a 1,363. Aplicando a equação 5, verificou-se que o levantamento realizado com VANT e não corrigido com pontos de apoio (VANT bruto) apresentou um t_{calc} de 2,941 (Tabela 5), sendo estatisticamente rejeitado no teste de acurácia. Já o levantamento com VANT e corrigido com os 12 pontos de apoio (VANT corrigido) resultou um t_{calc} de 1,080 em um limite de 1,363, sendo aceito como acurado.

Tabela 5. Resultados dos testes estatísticos de Acurácia

Avaliação da Acurácia		
	VANT bruto	VANT corrigido
Δh	-2,159	0,140
S	2,543	0,448
n	12	12
σ	0,170	0,170
$t_{10\% (11)}$	1,363	1,363
$ t_{calc} $	2,941	1,080
$\chi^2_{10\% (11)}$	17,275	17,275
$\chi^2_{calculado}$	55,953	14,941
Classe		
PEC-PCD	Classe D	Classe B

No que tange a geração dos produtos cartográficos a partir do levantamento com o VANT, nesta pesquisa considerou-se o erro padrão esperado (σ) de 1/6 da equidistância avaliada (1 m), concordando com Silva (2015) e Silva et al. (2016), com limite tabela x2 de 17,275, para um número de amostras (n) igual a 12, com nível de significância de 10% e 11 graus de liberdade (Tabela 5). O MDE bruto, após a aplicação do teste Qui-quadrado exemplificado na equação 6, resultou em um $\chi^2_{calculado}$ de 55,953, enquadrando o levantamento no PEC-PCD na Classe D. Logo o MDE corrigido, apresentou um resultado de $\chi^2_{calculado}$ de 14,941, gerando um produto PEC-PCD classe B.

Cubagem de volumes

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a acurácia dos levantamentos altimétricos com VANT e o seu uso como ferramenta de cubagem de volumes. Para tanto, os dados do levantamento topográfico foram comparados com o levantamento com o VANT bruto e com o VANT corrigido com pontos de controle.

Pode ser constatado na Tabela 6, que as altitudes mínimas e máximas e a amplitude topográfica encontrada no MDE corrigido com os pontos de controle, apresentam valores próximos aos resultados do levantamento topográfico e GNSS. Já os resultados destes parâmetros no MDE bruto, apresentaram discrepâncias maiores, na ordem de 1 a 5% nas altitudes e 12% na amplitude topográfica.

Essas diferenças encontradas nos MDEs citados se reproduziram nos resultados da cubagem, onde o MDE bruto apresentou um volume residual na jazida 33,56% menor que o

de referência. Já no volume de material extraído a redução foi de 7,8%, comparando o MDE de referência e o elaborado com o VANT sem pontos de controle.

As discrepâncias encontradas entre o MDE de referência e o MDE corrigido com os 12 pontos de controle foi menor que as diferenças encontradas no MDE bruto. No volume residual, o resultado encontrado no MDE corrigido foi 7,05% menor que a topografia de referência e no volume extraído os resultados foram 1,12% maiores que a topografia levantada com GNSS e topografia. Os valores cubados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados dos dados altimétricos e da cubagem de volume dos MDEs

MDE		Topografia	VANT Bruto	VANT Corrigido
Altitudes	Min	109,741	115,892	110,033
	Máx	161,656	160,337	162,138
Amplit. Topográfica		51,915	44,445	52,105
Volume (m³)	Residual	1.5464.792	1.039.600	1.454.602
	Extraído	4.874.321	4.494.187	4.928.889

Deve-se salientar que os resultados do VANT corrigido, provavelmente, estão mais próximos do volume real, inclusive comparado com os resultados da topografia com GNSS, concordando com as afirmações de Leitão et al. (2016) e Esposito et al. (2017). Isto porque, a nuvem de amostras da malha do MDE corrigida é muito maior que a quantidade de pontos levantada com a topografia e o GNSS, agregando densidade de informações. Ainda, o MDE corrigido é mais preciso em resultados que o MDE bruto, porque foram realizadas as correções de referências com os pontos de controle, creditando principalmente ao MDE, precisão nos dados altimétricos, pois o receptor de sinal GNSS embutido no VANT não gera boas precisões nas altitudes.

Conclusão

A cubagem de volumes é uma importante etapa de um empreendimento de mineração. A correta avaliação das reservas e dos volumes extraídos resulta em uma equidade financeira e fiscal do empreendimento.

O primeiro ponto a importante dos resultados desta pesquisa é a técnica utilizada no processamento, onde o método da similaridade entre imagens sobrepostas e devidamente orientadas gerou uma densa nuvem de pontos homólogos. Também contribui para a geração de uma nuvem densa de pontos homólogos a configuração dos parâmetros do plano de voo, onde a sobreposição lateral de 60% e a longitudinal de 70% gerou um ortomosaico sem vazios de imageamento.

Esta pesquisa também demonstrou em seus resultados que levantamentos altimétricos e a cubagem de volumes podem ser realizados com VANTs, desde que sejam realizadas as devidas correções nas imagens, principalmente com o auxílio de pontos de controle. Deve-se salientar que houve diferenças significativas, tanto nas cotas altimétrica quanto nos volumes dos produtos elaborados a partir do aerolevantamento não corrigido com pontos de controle. Já o aerolevantamento corrigido com pontos de controle, apresentou cotas altimétricas e volumes cubados próximos aos valores de referência calculados a partir de topografia, com diferenças entre 1 e 7%.

Pode-se também inferir que possivelmente o levantamento com VANT corrigido com pontos de controle é mais preciso no cálculo de volumes que o levantamento topográfico e GNSS. Isso porque gera uma nuvem mais densa de pontos com informações do terreno, resultando em informações tridimensionais mais fidedignas, principalmente em áreas com obstáculos, topografia acidentada e formas com dimensões diminutas. Salienta-se que o levantamento com VANT corrigido com pontos de controle é a melhor ferramenta para a solução do problema proposto, não podendo-se generalizar as considerações para qualquer tipo de levantamento topográfico.

Por fim, a avaliação da acurácia dos produtos gerados e comparados com o PEC-PCD mostraram que aerolevantamentos com VANT, desde que corrigidos com pontos de controle, resultam documentos cartográficos que se enquadram dentro da classe B. Já o mesmo levantamento sem os pontos de controle gera produtos classe D e com discrepâncias significativas.

Sendo assim, a presente pesquisa buscou demonstrar a eficácia do uso de VANTs na cubagem de volumes e a acurácia dos

resultados, evidenciando os cuidados metodológicos envolvidos na geração e avaliação dos produtos cartográficos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Núcleo de Estudos em Tecnologias do Geoprocessamento – NETGeo da Universidade Federal de Pelotas – UFPel pela disponibilização dos equipamentos topográficos e Geodésicos.

Referências

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1994. NBR13.133 - Execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro.
- Almeida, M. S., Dal Poz, W. R., 2016. Posicionamento por Ponto Preciso e Posicionamento Relativo com GNSS: qual o método mais acurado atualmente? Boletim de Ciências Geodésicas [online] 22. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702016000100010>. Acesso: 20 dez 2017.
- Alves Jr, L. R. 2015. Análise de produtos cartográficos obtidos com câmera digital não métrica acoplada a um veículo aéreo não tripulado em áreas urbanas e rurais no estado de Goiás. Dissertação (Mestrado). Goiânia, UFG.
- Azambuja, J. L. F. 2015 Potencialidades de serviços ON-LINE de Posicionamento por Ponto Preciso em aplicações geodésicas: uma análise envolvendo longo período de dados das estações da RBMC. Tese (Doutorado) Porto Alegre, UFRGS.
- Capolupo, A., Pindozzi, S., Okello, C., Fiorentino, N., Boccia, L., 2015. Photogrammetry for Environmental Monitoring: The Use of Drones and Hydrological Models for Detection of Soil Contaminated by Copper. Science of the Total Environment [online] 514. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv>. 2015.01.109. Acesso: 20 Jan. 2018.
- Chianucci, F., Disperati, L., Guzzi, D., Bianchini, D., Nardino, V., Lastrì, C., Rindinella, A., Corona, P., 2016. Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation [online] 47. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jag>. 2015.12.005. Acesso: 10 jun. 2017.
- Cryderman, C., Mah, S. B., Shufletoski, A. 2015. Evaluation of UAV photogrammetric accuracy for mapping and earthworks computations. GEOMATICA [online] 68/4 Disponível: <https://doi.org/10.5623/cig2014-405> Acesso: 18 jun. 2018.
- Dal'Forno, G. L., Sampaio, M. I. R., Aguirre, A. J., Hillebrand, F. L., 2009. Levantamento Planialtimétrico no plano topográfico local: estudo comparativo dos resultados obtidos a partir de métodos geodésicos e topográficos. GAEA – Journal of Geoscience. [online] 5/2. Disponível: <https://doi.org/10.4013/gaea.2009.52.01>. Acesso: 20 dez. 2017.
- DSG. Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. 2011 Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV). Brasília.
- Elias, E. N. N., Miranda, P. C. A., Cunha, A. A., Fernandes, V. O., 2017. Aplicação do Padrão de Exatidão Planimétrica para produtos cartográficos digitais (PEC-PCD). Geonordeste, Salvador. (Anais do Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto).
- Esposito, G., Mastrococco, G., Salvini, R., Oliveti, M., Starita, P., 2017. Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy. Environ Earth Sci [online] 76. Disponível: <https://doi-org.ez66.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s12665-017-6409-z> Acesso: mar. 2018.
- Ferreira, T. R., 2017. Volume útil de pilha de granel com retomada inferior. Dissertação (Mestrado). Ouro Preto, UFOP.
- Figueiredo, B. R., 2000. Minérios e ambiente. Ed. 1, Editora da Unicamp, Campinas.
- Galo, M., Camargo, P. O., 1994. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. UFSC, Florianópolis. (Anais do Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, 01).
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2017. Manual do Usuário: Aplicativo Online IBGE-PPP. Brasília.
- Jannoura, R., Brinkmann, K., Uteau, D., Bruns, C., Joergensen, R. G., 2015. Monitoring of crop biomass using true colour aerial photographs taken from a remote controlled hexacopter. Biosystems Engineering

- [online] 129. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.11.007>. Acesso: 18 jun. 2017.
- Jaud, M., Passot, S., Le Bivic, R., Delacourt, C., Grandjean, P., Le Dantec, N., 2016. Assessing the Accuracy of High Resolution Digital Surface Models Computed by PhotoScan® and MicMac® in Sub-Optimal Survey Conditions. *Remote Sensing* [online] 8/6. Disponível: <https://doi.org/10.3390/rs8060465>. Acesso: 18 jun. 2017.
- Karuppasamy, K., Kaliappan, S., Karthiga, R., Divya C., 2016. Surface Area Estimation, Volume Change Detection in Lime Stone Quarry, Tirunelveli District Using Cartosat-1 Generated Digital Elevation Model (DEM). *Circuits and Systems* [online] 07. Disponível: <http://dx.doi.org/10.4236/cs.2016.76073>. Acesso: 6 jun. 2017.
- Leitão, J. P., Vitry, M. M., Scheidegger, A., Rieckermann, J., 2016. Assessing the quality of digital elevation models obtained from mini unmanned aerial vehicles for overland flow modelling in urban areas. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* [online] 20. Disponível: <https://doi.org/10.5194/hess-20-1637-2016>. Acesso: 20 jan. 2017.
- Linhares, M. M. de A., 2016. Uso de veículo aéreo não tripulado na determinação de Índice de vegetação em área de pastagem em Nova Mutum-MT. Dissertação (Mestrado). Goiânia, UFG.
- Lizarazo, I., Angulo, V., Rodríguez, J., 2017. Automatic mapping of land surface elevation changes from UAV-based imagery. *Internacional Journal of Remote Sensing* [online] 38. Disponível: <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1278313>. Acesso: 15 jan. 2018.
- Monico, J. F. G., 2008. Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicação, 2ª edição. Ed. da UNESP, São Paulo.
- Munaretto, L. A. C., 2017. VANT e DRONES: A aeronáutica ao alcance de todos. 2ª edição. Ed. Independente, São José dos Campos.
- Silva, C. A., 2015. Avaliação da acurácia dos ortomosaicos e modelos digitais do terreno gerados por vant e sua aplicação no cálculo de volume de pilhas de rejeito da pedra cariri. Dissertação (Mestrado) Fortaleza, UFC.
- Silva, C. A., Duarte, C. R., Souto, M. V. S., Santos, A. L. S., Amaro, V. E., Bicho, C. P., Sabadia, J. A. B., 2016. Avaliação da acurácia do cálculo de volume de pilhas de rejeito utilizando VANT, GNSS e LIDAR. *Boletim de Ciências Geodésicas* [online] 22/1. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702016000100005> Acesso: 10 jun. 2017
- Ribeiro Jr., S., 2011. Determinação de volumes em atividades de mineração utilizando ferramentas do sensoriamento remoto. Tese (Doutorado) Viçosa, UFV.
- Santos, A. P., Medeiros, N. G., Santos, G. R., Rodrigues, D. D., 2015. Controle de qualidade posicional em dados espaciais utilizando feições lineares. *Boletim de Ciências Geodésicas* [online], 21. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-217020150002000013>. Acesso: 18 jun. 2017.
- Santos, A. P., Rodrigues, D. D., Santos, N. T., Gripp Jr. J., 2016. Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais utilizando técnicas de estatística espacial: proposta de método e exemplo utilizando a norma brasileira. *Boletim de Ciências Geodésicas* [online] 22/4. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702016000400036>. Acesso: 10 jun. 2017.
- Santos, L. F. B., 2016. Avaliação de modelo digital de terreno gerado através de VANT em planícies pantaneiras. Monografia (Graduação). Cuiabá, UFMT.
- Sebem, E., Catem, A., Robaina, A. D., Moreira, A. L. L., Pellegrini, G. C., 2010. Fundamentos de cartografia e o sistema de posicionamento global GPS. 1 ed. Editora da UFSM, Santa Maria.
- Souza, G., 2015. Análise de viabilidade do uso de VANT para mapeamentos topográfico e de cobertura e uso da terra. Monografia (Graduação). Porto Alegre, UFRGS.
- Toutin, T., Gray, A. L., 2000. State-of-the-art of extraction of elevation data using satellite SAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online] 55/1. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00039-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00039-8). Acesso: 18 jun. 2017.
- Zanetti, J., Paula, R. M., Santos, A. P., Medeiros, N. G., 2016. Avaliação da acurácia posicional planimétrica de ortoimagens disponibilizadas nos sistemas de informações geográficas. *Revista Brasileira de Cartografia* [online] 68/7. Disponível: <http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/viewFile/1585/1010>. Acesso: 20 jun. 2017.