



Revista Brasileira de Cartografia (2013) N<sup>o</sup> 65/4: 661-671  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **FOTOGRAMETRIA TERRESTRE DIGITAL NA AMOSTRAGEM DE MINA SUBTERRÂNEA: EXAME COMPARATIVO COM TÉCNICAS TRADICIONAIS**

*Digital Photogrammetry in Underground Mine Sampling: A Comparative Test to Traditional Techniques*

**Isabella do Carmo Assis & Marcos Antônio Timbó Elmiro**

**Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG**

**Instituto de Geociências**

Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte / Minas Gerais  
isabella.icassis@gmail.com,  
mtimbo@ufmg.br

*Recebido em 05 de outubro, 2012/ Aceito em 23 de janeiro, 2013*

*Received on October 05, 2012/ Accepted on January 23, 2013*

### **RESUMO**

Diante da possibilidade de aplicação da fotogrametria terrestre digital com o uso do sistema Sirovision para a realização da amostragem de canais em minas subterrâneas este trabalho tem objetivo de comparar os resultados dessa amostragem a partir do modelo digital de superfície gerado por fotogrametria com o levantamento topográfico feito por estação total. A metodologia se baseou na sobreposição dos arquivos das seções da amostragem obtidos pelos dois métodos: fotogrametria terrestre digital com o sistema Sirovision e levantamento topográfico. O resultado da correlação das coordenadas X, Y e Z entre os dois tipos de dados foi satisfatório, apresentando coeficientes de correlação variando entre 0.983 e 0.999. A maior correlação ocorreu nas coordenadas do eixo X e a menor nas do eixo Y. O erro médio quadrático variou entre 0,07m e 0,79m, sendo o menor valor no eixo X e o maior no eixo Y. Embora o sistema Sirovision possa agilizar a coleta dos dados no subsolo e proporcionar maior nível de detalhes às seções da amostragem, o processamento das imagens para a criação do modelo 3D registrado ainda é bastante moroso. Outro ponto negativo é a ocorrência de falhas na estereoscopia dos pares de fotos em alguns pontos, podendo comprometer a identificação litológica. Apesar dos problemas, conclui-se por ser vantajosa a futura implantação operacional do Sirovision nos trabalhos da mina subterrânea, tendo em vista que os softwares e demais componentes do sistema estão sendo objeto de freqüentes atualizações com vistas à agilização do processo.

**Palavras chaves:** Fotogrametria Terrestre, Fotogrametria Subterrânea, Topografia de Minas, Precisão Posicional.

### **ABSTRACT**

Facing the possibility of terrestrial digital photogrammetry application using the Sirovision system to perform channel sampling in underground mines this study has the goal of comparing the results of this type of sampling from the digital surface model registered with field survey done by total station. The methodology was based on the overlapping sections of sample archives obtained by the two methods: terrestrial digital photogrammetry with Sirovision system and field surveying. The result of coordinates X, Y and Z correlation between the two data types were satisfactory, with

correlation coefficients ranging between 0.983 and 0.999. The strongest correlation occurred at X axis coordinates and the minor at Y axis. The root mean square error ranged between 0.07 m and 0.79 m, with the lowest value on the X axis and the higher in Y axis. Although the Sirovision system can streamline data collection in underground mine and provide a higher level of detail to sampling sections, the image processing to create the registered 3D model is still quite slow. Another disadvantage is the occurrence of failures in the photographic stereoscopic pairs in some places that may compromise the lithologic identification. Yet these problems, it seems to be advantageous the forward operational use of Sirovision in the work of underground mine because the software and system components are subject to frequent updates in order to speed up the process.

**Keywords:** Terrestrial Photogrammetry, Underground Photogrammetry, Mining Topography, Positional Accuracy.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais a ciência e a tecnologia tem se mostrado forte aliada das empresas e do mercado produtor que visam agilidade na obtenção da informação associada à confiabilidade e à segurança dos seus colaboradores. Dentro dessa linha o Instituto de Pesquisa do Governo Australiano desenvolveu o Sirovision. Trata-se de um sistema baseado em fotogrametria digital desenvolvido para captura de dados geotécnicos e geológicos (estruturas, atitudes de planos e feições geológicas) que utiliza a combinação de cálculos matemáticos com fotografias digitais auxiliando na construção do modelo tridimensional (3D) de alta qualidade (TUCKER, 2009). Sua aplicação pode ser feita tanto para mina a céu aberto quanto para mina subterrânea (CSIRO, 2003). O presente estudo enfoca trabalhos desenvolvidos em mina subterrânea.

A fotogrametria digital é uma técnica de medição bastante evoluída e consolidada, seu uso tem sido intenso em muitas áreas técnicas e científicas (WOLF e DEWITT, 2000; ANDRADE, 1998; FALKNER e MORGAN, 2002; BRITO e COELHO, 2002; FERNANDES, 2010). Porém, sua aplicação nas medições em ambientes de minas subterrâneas não é muito conhecida, com raras referências encontradas na literatura.

O Sirovision é constituído da combinação de *hardware* (arranjo customizado para mina subterrânea de duas câmeras comerciais, luzes auxiliares e flash - Figura 1) e *software* (os módulos SiroLink, que converte as imagens para tif, Siro3D, que cria o modelo 3D, e o SiroJoint, que cria os grupos de dados estruturais utilizando o modelo 3D). Neste trabalho foi utilizado também o Studio 3, externo ao sistema, para procedimentos fotogramétricos complementares.

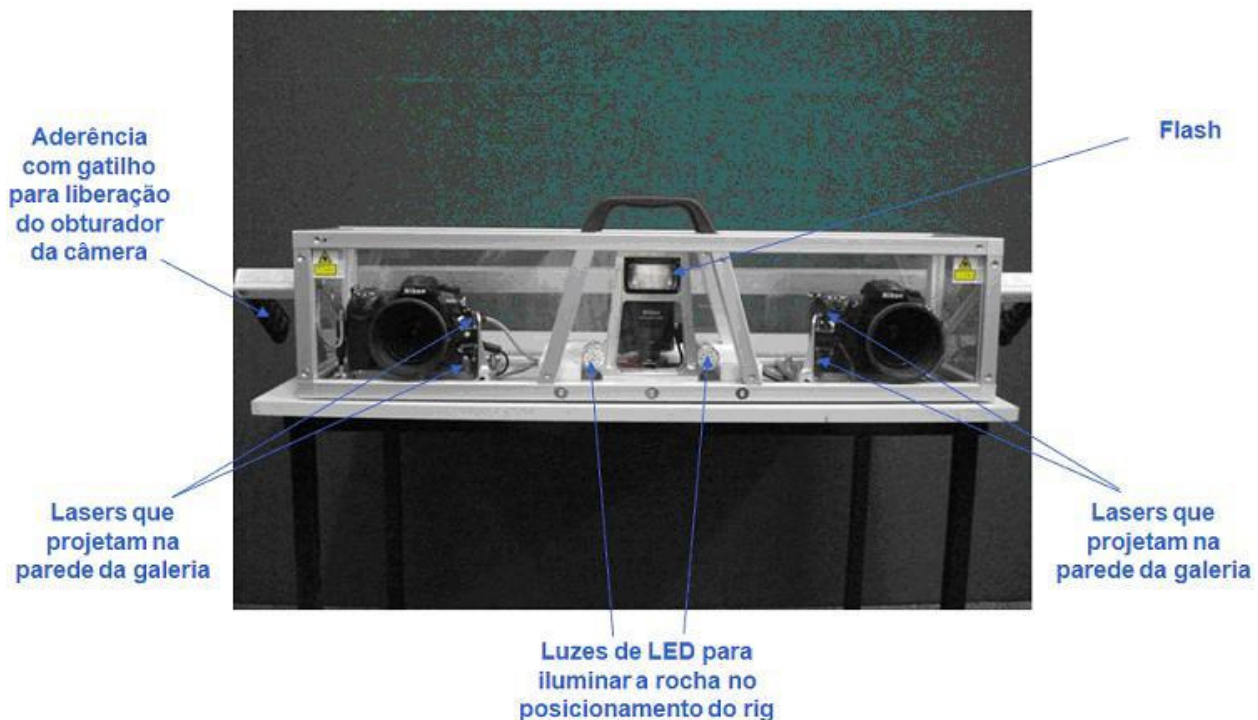


Fig. 1 - Composição do conjunto estéreo para mina subterrânea.

A captura do par de fotografias digitais em 2D de uma mesma área se dá a partir de um único disparo e a abrangência da cobertura varia entre 3 e 5 m<sup>2</sup>, de acordo com a distância do conjunto estéreo em relação ao local a ser fotografado (TUCKER, 2009). As imagens são posteriormente processadas no computador para gerar a imagem 3D registrada com as coordenadas do sistema da mina (orientação externa). Esse modelo tridimensional de alta qualidade servirá de ponto inicial para o desenvolvimento de pesquisas nas áreas da mecânica de rochas e da geologia, uma vez que permite a obtenção de dados detalhados e registrados com as coordenadas do sistema do terreno (georreferenciados) sobre toda área fotografada.

Tendo em vista a potencial aplicação da fotogrametria terrestre digital em minas subterrâneas a partir do Sirovision, o presente trabalho tem papel relevante na análise comparativa entre as informações de amostragem de canal obtidas através do modelo tridimensional georreferenciado e os dados obtidos pelo método tradicional de levantamento das informações com a estação topográfica eletrônica ou estação total. O método de levantamento de dados com uso de estação topográfica eletrônica também é uma tecnologia já consolidada e divulgada (GHILANI e WOLF, 2008)

### **1. 1 Objetivos**

Dentro desse enfoque, o objetivo geral do trabalho é avaliar a aplicabilidade da fotogrametria terrestre digital para amostragem de mina subterrânea de modo a determinar sua viabilidade operacional. Além disso, visa comparar os resultados da amostragem de canais, que são feições específicas de interesse da mineração, obtidos a partir do modelo tridimensional resultante da fotogrametria digital e do levantamento realizado pela medição topográfica com a estação total, mostrando quantitativamente e ou qualitativamente as diferenças entre os métodos, bem como, destacando vantagens e desvantagens.

## **2. METODOLOGIA**

A metodologia utilizada no trabalho consistiu basicamente de duas fases. Uma fase no subsolo da mina, onde foi inicialmente definida a área a ser fotografada, seguida da marcação e do levantamento

topográfico dos pontos de controle e completada pela aquisição das fotografias da área da mina a ser amostrada. Na segunda fase, realizada em escritório, já na superfície da mina, ocorreu a transferência das fotos para o computador, a conversão das imagens para formato tif, o reordenamento dos pares estereoscópicos, a associação das fotos com os pontos de controle, a geração das imagens corrigidas, a colocação das imagens no sistema de coordenadas da mina (coordenadas de terreno), a geração do modelo 3D, a elaboração das seções de canal extraídas do modelo 3D, a extração das coordenadas definidoras dos canais, a comparação com as coordenadas dos canais obtidas por estação total e por fim a análise dos resultados. Os detalhes explicativos relacionados a esses tópicos serão abordados a seguir.

### **2.1 Caracterização da área de estudo**

A área objeto do estudo fica na Mina Cuiabá que é uma mina subterrânea de propriedade da AngloGold Ashanti. Essa mina está localizada no Quadrilátero Ferrífero, no município mineiro de Sabará e tem como principal atividade a extração de ouro. A Figura 2 ilustra detalhes da localização geográfica da área do experimento (ANGLOGOLD ASHANTI, 2010).

### **2.2 Coleta dos dados de campo**

Por se tratar de uma análise comparativa, envolvendo os mesmos dados obtidos por técnicas diferentes, foram tomados os cuidados de fazer o levantamento fotogramétrico com o Sirovision concomitante ao levantamento por estação total realizado pela equipe de amostragem da mina. Levando em consideração que o estudo foi desenvolvido em uma mina em operação, onde a rotina de trabalho é constante e os cenários de escavações muito dinâmicos, a coleta de dados em períodos distintos poderia prejudicar a análise, ou até mesmo impossibilitá-la.

Para a aquisição dos pares fotográficos foi utilizado o arranjo customizado de *hardware* (conjunto estéreo) para aquisição de fotos em subsolo. Esse equipamento é composto por duas câmeras digitais reflex da marca Nikon, modelo D200 com objetiva de 20 milímetros, e também por quatro pontos de lasers, flash e luzes acoplados, assim como um suporte de instalação. As câmeras utilizadas em fotogrametria necessitam de ser



## AngloGold Ashanti Brasil Mineração

## Operações AngloGold Ashanti no Estado de Minas Gerais



Fig.2 - Localização da Mina Cuiabá. Fonte: Relatório Anual Interno (ANGLOGOLD ASHANTI, 2010).

calibradas para garantir resultados finais confiáveis (BAZAN et al, 2007; WOLF e DEWITT, 2000). As câmeras métricas do Sirovision contam com parâmetros já definidos em um certificado de calibração (Figura 3). Os parâmetros constantes do certificado são: O modelo da máquina fotográfica, a dimensão da lente, o número de série da câmera, o tamanho do pixel usado para calibração em micrometros e o tamanho da imagem na horizontal e vertical em pixels.

Após definida a área a ser amostrada a equipe responsável realizou o levantamento dos canais com a estação total. Em seguida, para iniciar o processo de aquisição dos pares fotográficos pelo Sirovision foi feita a marcação com tinta *spray* dos pontos de controle (pré sinalização) necessários para o georreferenciamento das imagens. As coordenadas X, Y e Z dos pontos de controle foram levantadas pela equipe de amostragem através da estação total da marca *Leica Geosystems*. A Tabela 1 mostra os pontos de controle do primeiro par estereoscópico (1, 2 e 3), onde o eixo Z representa a altitude em relação ao nível do mar. Essas coordenadas

```
Camera: NIKON D200 Rig Number: 1
Left Camera: NIKON 20mm EF 20mm Serial Number: 401193
20.5844 -52.907 -269.7206
259.9085 -264616.1278 -838837676.0875 2.8667e-017 -4.1155e-016 0
8.1558 2896 1944 0 -52.907
Right Camera: NIKON 20mm EF 20mm Serial Number: 401197
20.5844 -129.2569 -120.8259
252.1212 -198822.3457 -1049783255.5837 -6.3648e-016 -6.189e-017 0
12.2 1936 1296 0 -129.2569
```

Fig.3 - Parâmetros de calibração das câmeras (esquerda e direita) do Sirovision.

Tabela 1 - Coordenadas dos pontos conhecidos

PONTOS CONHECIDOS	COORDENADAS		
	X	Y	Z
(pontos de controle)			
M-4	-93045,012	-91293,108	
1	-92422,8	-91266,8	515,07
2	-92421,7	-91267,2	516,004
3	-92420,4	-91266,1	514,816

(expressas em metros) estão amarradas ao sistema local de referência geográfica utilizado na mina, o qual tem o ponto M-4, localizado no *open pit*, como marco topográfico materializado (Tabela 1).

As coordenadas dos pontos de controle, bem como dos demais pontos da amostragem, levantadas pela estação total foram processadas em superfície com a utilização do software *Topograph*. Foram adquiridos doze pares estereoscópicos, distribuídos em quatro faixas verticais com três pares em cada faixa. O levantamento das imagens foi feito da esquerda para a direita seguindo a numeração crescente das seções da amostragem.

### 2.3 Processamento dos dados

As fotografias foram transferidas para o computador utilizando software *Sirolink* (módulo do sistema *Sirovision*). Em seguida foi feito o ordenamento dos pares fotográficos. Nesse momento são indicados os pares de imagens e a ordem de captura dos mesmos. Feito isso chega o

momento de associar o primeiro par de imagens aos pontos de controle, importando o arquivo com as coordenadas desses pontos, e os demais pares com o anterior para que seja feita a correção das imagens. A Figura 4 mostra os pontos de controle no primeiro conjunto de fotos, o qual será referência para o segundo e o terceiro terá o segundo como referência. Assim, a ligação é feita pelo método de modelos independentes requerendo controle no final das faixas.

No processo de correção das imagens as distorções são removidas com base nos parâmetros das câmeras, previamente calibradas, conforme certificado fornecido junto ao sistema (Figura 3). O *software* utiliza também as informações de coordenadas dos pontos de controle para definir as coordenadas de todo e qualquer ponto constituinte das imagens. Sendo assim, a partir desse ponto as imagens estão individualmente corrigidas e orientadas externamente em relação ao sistema de coordenadas do terreno.

Na próxima etapa é utilizado o software Studio 3 da empresa CAE Mining que finaliza as operações fotogramétricas fazendo a reconstrução do modelo. Nesse momento executa-se a sobreposição das fotos da câmera da direita e da esquerda para a geração de um modelo tridimensional. O resultado da sobreposição do par de fotos é apresentado em número percentual de pontos que foram restituídos corretamente. A Figura 5 mostra um exemplo onde a restituição do par de fotos ocorreu com 86% de sucesso. Neste exemplo, a Figura 5b representa a imagem original e a Figura 5a representa a imagem correspondente com a representação das áreas bem sucedidas (em branco) e mal sucedidas na restituição. As áreas onde a restituição não ocorreu com sucesso são representadas na Figura 5a como buracos ou borrões escuros. Estas falhas podem ocorrer em lugares com presença de material litológico não tão

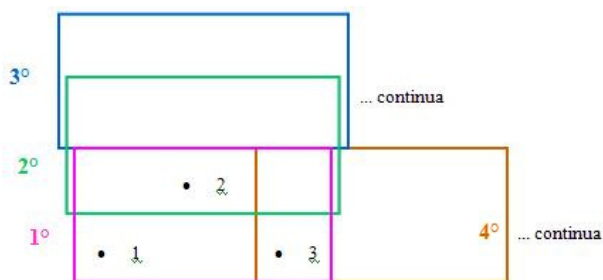
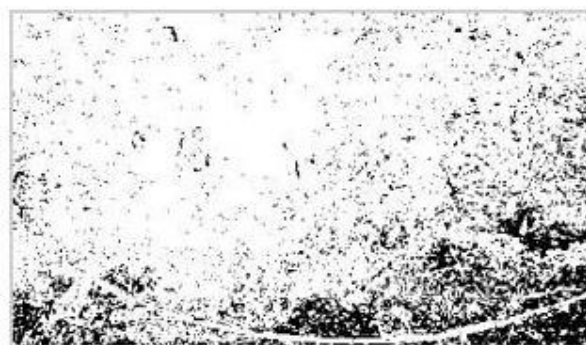


Fig.4 – Associação dos conjuntos de imagens com o par usado como referência para correção das imagens.



a



b

Fig.5 - Exemplo onde a restituição das fotos ocorreu com 86% de sucesso. a) imagem b) mapeamento do resultado indicando locais escuros onde houve falhas.

coeso, onde a textura é muito uniforme, apresentando correlação fraca e os dados não puderam ser validados.

No final do procedimento de restituição é gerado o modelo tridimensional georreferenciado a partir dos doze pares de fotos estereoscópicas. Esse modelo servirá de base para a análise comparativa entre os dados de canais da amostragem obtidos tanto pela estação total como pela fotogrametria terrestre digital. Para melhor compreensão e visualização do processo a Figura 6a ilustra uma vista de perfil lateral esquerda do modelo tridimensional revestido com a textura das imagens. A Figura 6b ilustra uma vista similar a partir da lateral direita e a Figura 6c ilustra a vista frontal do modelo tridimensional.

#### 2.4 Elaboração dos dados de canais a partir do modelo 3D georreferenciado

O modelo 3D georreferenciado resultante do processo (Figura 7) é um Modelo Digital de Superfície (MDS) constituído por uma nuvem de pontos que são visualizados espacialmente através de uma triangulação irregular, onde cada vértice da triangulação tem sua posição definida pelas

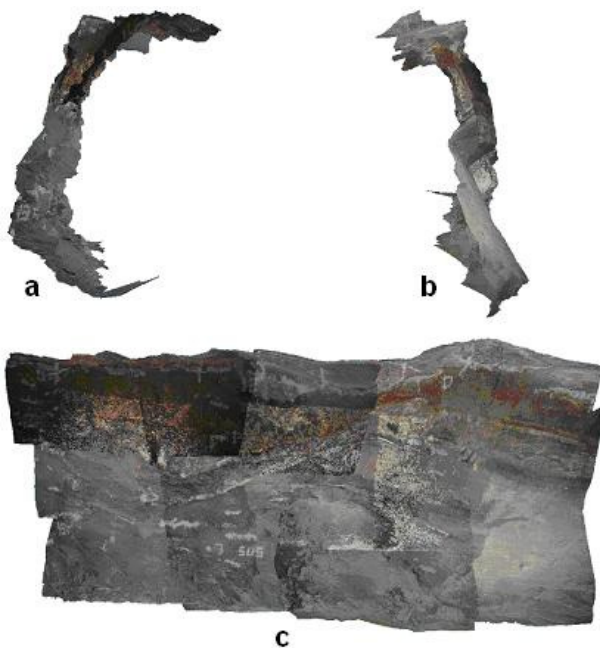


Fig.6 - Modelo 3D georreferenciado. a) vista em perfil da esquerda para a direita. b) vista da direita para a esquerda e c) vista frontal.

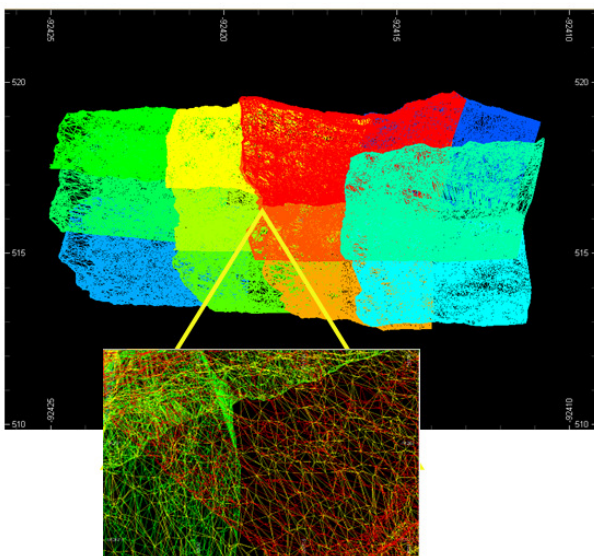


Fig.7 - Visualização do arranjo triangular da nuvem de pontos do modelo 3D. Cada coloração corresponde a um par de fotos.

coordenadas X, Y e Z (KRAAK e ORMELING, 2010).

Partindo da premissa que cada ponto do modelo possui as coordenadas X, Y e Z é possível a criação das seções de canais de forma digital. Assim, com a imagem 3D carregada no Studio 3 elaborou-se um arquivo com seis seções de canais na posição real, ou seja, com suas coordenadas de terreno. As seções, em amarelo, foram criadas ligando os pontos, conhecidos como bigodes, marcados com tinta azul na parede da galeria pela

equipe de amostragem antes da tomada das fotografias (Figura 8).

A próxima etapa é a análise e discussão dos resultados que envolvem a comparação do posicionamento das seções adquiridas pelo método topográfico da estação total e pelo uso do sistema Sirovision baseado em fotogrametria digital.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Método de Comparação dos dados

Para uma análise sobre a viabilidade operacional de aplicação do Sirovision na amostragem em mina subterrânea faz-se necessária uma comparação criteriosa das informações obtidas. Essa análise da qualidade e confiabilidade das informações provenientes da fotogrametria terrestre digital teve como ponto referencial os dados coletados por meio do uso da estação total. Esses dados são coletados pela equipe de amostragem da mina e são utilizados para o desenvolvimento da rotina de trabalho como também em pesquisas sobre o comportamento do maciço rochoso. Foram adotados três métodos de comparação, sendo a comparação visual entre as seções, a medida estatística do erro entre as coordenadas (erro médio quadrático) e a correlação linear também entre as coordenadas. Os métodos e resultados são discutidos nos tópicos a seguir.

##### 3.1.1 Análise Comparativa visual das seções

Na primeira forma de comparação, a análise visual, o arquivo das seções adquiridas pela fotogrametria terrestre digital foi sobreposto ao arquivo levantado pela estação total, o qual é tomado como verdade, e visualmente as diferenças de posições espaciais foram observadas, apresentando uma aparente sobreposição, principalmente o início e fim de cada seção.

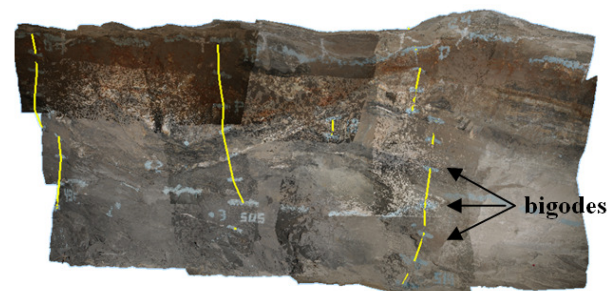


Fig.8 - Seções de amostragem.

Para uma análise visual mais acurada da sobreposição das seções foi preciso levar em consideração diferentes ângulos de visualização espacial, pois dessa forma foi possível observar as diferenças na altura, profundidade e inclinação das seções.

Conforme observado na Figura 9 onde é apresentada uma visão frontal das seções (em azul as seções obtidas pela estação total e em verde as obtidas pelo Sirovision) notou-se certa correspondência entre a posição e o formato, principalmente nas seções 1, 3 e 5. Na seção 2 foi possível observar maior semelhança apenas na posição dos primeiros pontos. As seções 4 e 6 apresentaram as maiores diferenças.

Nas Figuras 10 e 11 onde as seções são vistas em perfil foi possível observar pequenas diferenças na profundidade e na inclinação, principalmente entre as seções 4, 5 e 6. Já as seções 1 e 2 e 3 apresentaram melhor nível de sobreposição, salvo em alguns trechos onde pode ter ocorrido aprofundamento da parede rochosa.

Assim, de modo visual, o posicionamento das seções obtidas através da fotogrametria terrestre digital foi considerado satisfatório, tendo em vista que as informações obtidas pelo modelo tridimensional digital se aproximaram dos dados coletados *in loco* pelo uso da estação total.

### 3.1.2 Análise estatística do erro entre as coordenadas

A análise visual, porém não é suficiente para uma conclusão segura acerca da qualidade e confiabilidade da informação fornecida pelo Sirovision. O *Root Mean Square Error (RMSE)* também conhecido como Erro Médio Quadrático

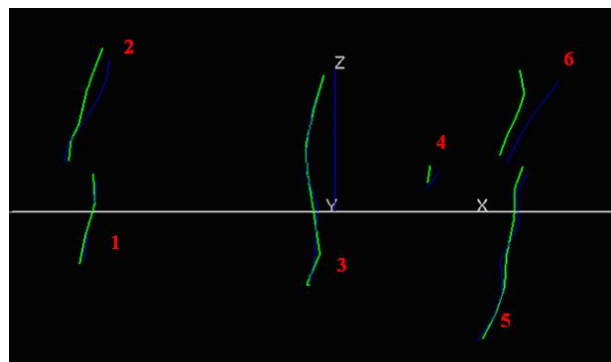


Fig.9 - Visão frontal das seções (estação total em azul e Sirovision em verde). A linha horizontal representa o eixo X e a linha vertical o eixo Z.

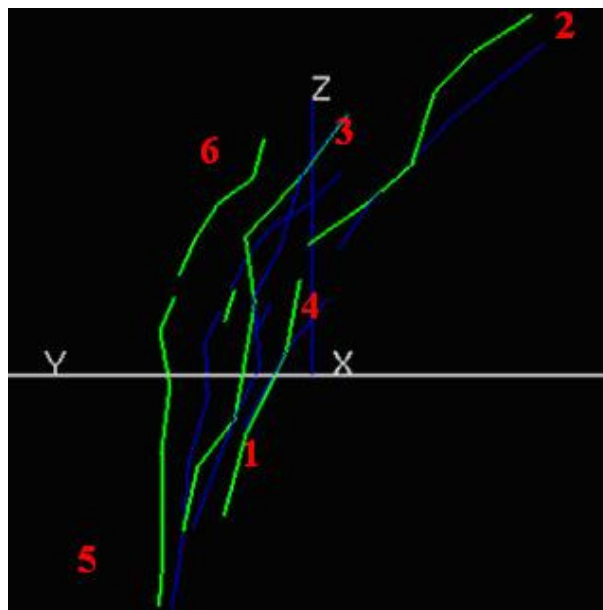


Fig.10 - Visualização em perfil, da esquerda para a direita, das seções amostradas (estação total em azul e Sirovision em verde).

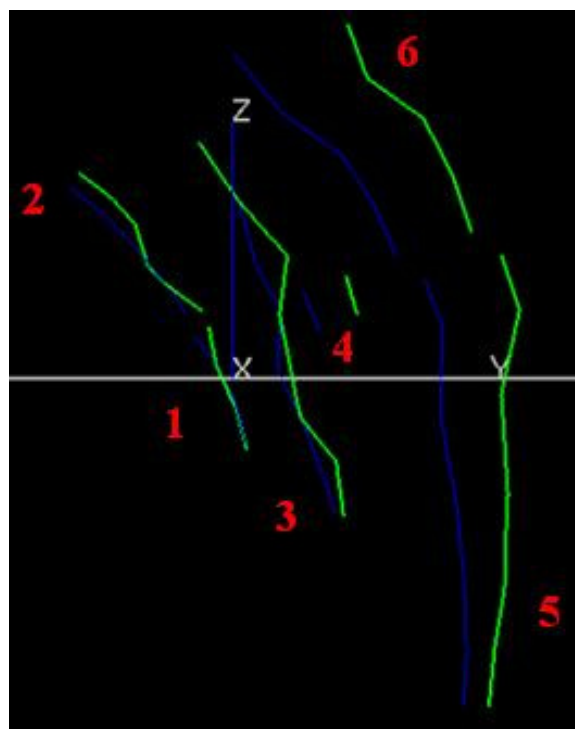


Fig.11 - Visualização em perfil, da direita para a esquerda, das seções amostradas (estação total em azul e Sirovision em verde).

(EMQ) é um método analítico que pode ser adotado para esse propósito, pois fornece uma estimativa estatística robusta da magnitude do erro (MOORE e McCABE, 1999). Para análise do *RMSE* foram comparadas as coordenadas X, Y e Z de cada ponto do arquivo gerado através do uso do modelo 3D com as coordenadas do arquivo adquirido pela

estação total. A expressão do *RMSE* é dada pela Equação 1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E - S)^2}{n}} \quad (1)$$

Onde,

*E* são as coordenadas X, Y ou Z obtidas através do uso da estação total;

*S* são as coordenadas X, Y ou Z obtidas através do uso do sistema Sirovision;

*n* é o número total de pontos da mesma seção.

Quanto menor o valor obtido a partir da utilização da Equação 1 maior será a relação entre as coordenadas. A comparação entre as coordenadas foi feita de maneira separada para os três eixos X, Y e Z. O *RMSE* foi calculado individualmente para cada seção, levando em consideração o número de pontos da seção e também o mesmo eixo de coordenadas, ou seja, foram comparadas as coordenadas X de cada seção gerada pela fotogrametria terrestre digital com as coordenadas X levantadas pela estação total. O mesmo procedimento foi realizado para os eixos Y e Z.

O cálculo do *RMSE* geral das coordenadas dos eixos X, Y e Z também foi realizado. Dessa maneira foi usado como base o número total de pontos levantados e não mais os pontos de cada seção.

A Tabela 2 apresenta os resultados em metros do *RMSE* de cada eixo de coordenadas. Os valores estão segregados por seção e também com a soma total dos pontos de todas as seções.

Os valores indicam que a maior discrepância entre as coordenadas ocorreu no eixo Y e a maior semelhança ocorreu no eixo X, com valores aproximados de 0.42m e 0.15m, respectivamente (Tabela 2). O *RMSE* resultante da composição dos três eixos X, Y e Z de todo o conjunto de pontos (*RMSE 3D*) resultou no valor 0.51054 metros (0.51m).

Analisando as seções individualmente observa-se que as seções 1 e 2 apresentaram os menores valores nos três eixos de coordenadas, o que reforça a análise espacial feita visualmente no tópico anterior.

Tabela 2 - Resultados do *RMSE* das seções e do total de pontos coletados

ROOT MEAN SQUARE ERROR – RMSE (metros)			
SEÇÃO	X	Y	Z
1	0.07754	0.11014	0.10297
2	0.15465	0.14217	0.14560
3	0.07203	0.25173	0.36467
4	0.10554	0.41107	0.15908
5	0.15493	0.46931	0.13109
6	0.26098	0.79307	0.31470
<b>TOTAL</b>	<b>0.15206</b>	<b>0.42210</b>	<b>0.24364</b>

Apesar da existência de alguns valores aparentemente elevados na Tabela 2 e, também, de o *RMSE 3D* ter resultado em 0.51 metros, esses valores ainda podem fornecer uma indicação favorável à aplicação da fotogrametria terrestre digital na aquisição de informações para amostragem de mina subterrânea. Ou seja, é possível que esses erros, moderadamente elevados (o maior erro de 0.8m obtido no eixo Y), possam ser significativamente reduzidos com repetições do experimento em melhores condições de aquisição, tendo em vista que a área amostrada no presente estudo foi de 30 metros.

### 3.1.3 Análise da correlação linear entre as coordenadas

Com o intuito de reforçar a análise comparativa, também foi calculada a correlação entre as coordenadas para medir o grau de associação entre os dados espaciais X, Y e Z adquiridos pela estação total e aqueles adquiridos pelo Sirovision. O coeficiente de correlação (*r*) é dado pela Equação 2, onde os termos *E* e *S* são os mesmos já definidos na Equação 1.

$$r = \frac{\sum (E_i - \bar{E}) * (S_i - \bar{S})}{\sqrt{[\sum (E - \bar{E})^2] * [\sum (S_i - \bar{S})^2]}} \quad (2)$$

O coeficiente de correlação mede o grau de associação linear entre duas variáveis, seu valor situa-se no intervalo de -1 a +1. Os valores são negativos se uma variável cresce enquanto a outra diminui ou vice versa e são positivos se as duas variáveis crescem ou diminuem conjuntamente (MOORE e McCABE, 1999). De acordo com a Tabela 3, para *r* igual a +1 significa que há uma



perfeita associação direta entre as variáveis. Para  $r$  igual a -1 há uma perfeita associação inversa entre as variáveis. E se  $r$  igual a 0 (zero) não há qualquer associação linear entre as variáveis.

A análise dessas informações foi feita a partir de três diagramas de dispersão com todos os pontos de coordenadas de cada eixo X, Y e Z. Em cada gráfico também foi representada a linha reta de regressão calculada pela Equação 3.

$$S_{(est)} = a + b * E \quad (3)$$

Onde,

$a$  é o interceptor no eixo “y” (valor  $S$  quando  $E$  é zero);

$b$  é a inclinação da reta (coeficiente de regressão);

$E$  são as coordenadas X, Y ou Z obtidas através do uso da estação total;

$S (est)$  são as coordenadas X, Y ou Z estimadas.

Os pontos no diagrama de dispersão são analisados de modo que, quanto mais próximos da linha de regressão maior é a correlação entre os valores das coordenadas obtidas pelos dois levantamentos.

Com base na análise dos gráficos de dispersão apresentados nas Figuras 12, 13 e 14 e nos valores do coeficiente de correlação foi possível afirmar que a maior correlação entre as coordenadas ocorreu no eixo X, onde o coeficiente de correlação é de 0.999 (Figura 12). Valor esse que comprova uma correlação muito forte, conforme Tabela 3, reforçando resultados já analisados nos métodos apresentados anteriormente.

A menor correlação entre as coordenadas ocorreu no eixo Y, onde o coeficiente de correlação é de 0.983 (Figura 13) estando, também, em conformidade com resultados dos outros métodos de comparação. No entanto, de acordo com a

Tabela 3 - Interpretação dos valores do coeficiente de correlação

VALOR DE r (+ ou -)	INTERPRETAÇÃO
0.00 a 0.19	Correlação muito fraca
0.20 a 0.39	Correlação fraca
0.40 a 0.69	Correlação moderada
0.70 a 0.89	Correlação forte
0.90 a 1.00	Correlação muito forte

Tabela 3, esse valor de  $r$  ainda está na faixa de correlação muito alta.

O eixo Z apresentou o coeficiente de correlação igual a 0.992, o que significa também uma correlação muito alta entre as coordenadas (Figura 14).

Cabe observar que a correlação é uma análise complementar ao *RMSE* e apropriada para a comparação dos dados obtidos por fotogrametria digital e por estação total. Se as coordenadas geradas pelos dois métodos fossem exatamente iguais (que seria o caso ideal) o coeficiente de correlação  $r$  seria +1, todos os pontos dos gráficos das Figuras 12, 13 e 14 ficariam exatamente sobre a reta de regressão e o *RMSE* seria zero. Assim, com base nos resultados dos altos coeficientes de correlação ( $r$ ) e nos gráficos das Figuras 12, 13 e 14 que apresentaram nuvens de pontos da dispersão se aproximando muito das retas de regressão, pode-se afirmar que as informações produzidas pela fotogrametria terrestre digital através do Sirovision possuem alta correlação linear com as informações advindas do uso da estação total, reforçando a compatibilidade dos dois métodos.

#### 4. CONCLUSÕES

O estudo apresentado teve como objetivo a análise comparativa entre as informações da posição espacial (coordenadas X, Y e Z) das seções de amostragem adquiridas pelo uso da estação total, que é o método de rotina nos trabalhos da mina, em confronto com os dados obtidos a partir de um modelo digital de superfície gerado por fotogrametria terrestre digital usando o sistema Sirovision. Por se tratar de uma técnica nova para trabalhos em mina subterrânea foi necessária a validação das informações tendo como base os dados de seções adquiridos pelo método tradicional de levantamento por estação total utilizado na mina.

Apesar de algumas discrepâncias, de maneira geral os resultados obtidos com o uso da fotogrametria foram considerados compatíveis com aqueles adquiridos pela estação total. A conclusão foi reforçada pelos altos valores do coeficiente de correlação entre as coordenadas dos eixos X, Y e Z de ambos os métodos de aquisição das informações, indicando uma quase perfeita associação positiva e direta entre as variáveis.

Os resultados de análise do *RMSE*, apesar de apresentarem problemas, permitem prever

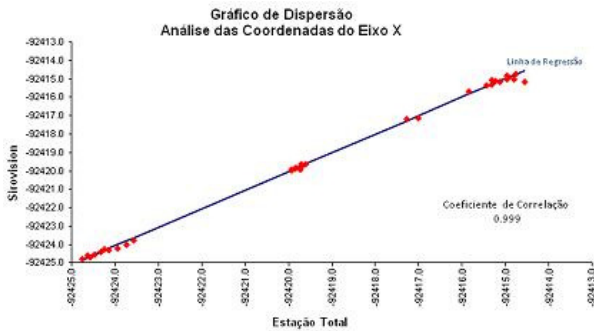


Fig.12 - Gráfico de dispersão das coordenadas do eixo X obtidas pelos dois métodos.



Fig.13 - Gráfico de dispersão das coordenadas do eixo Y obtidas pelos dois métodos.

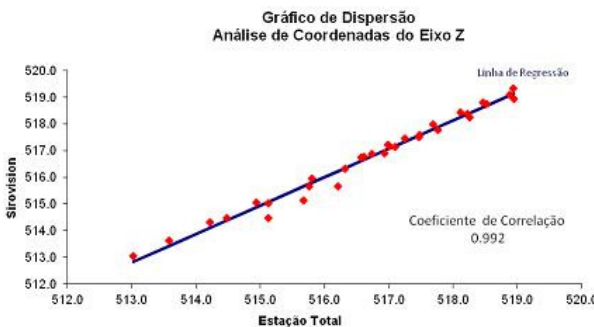


Fig.14 - Gráfico de dispersão das coordenadas do eixo Z obtidas pelos dois métodos.

grande potencial de uso das informações provenientes do modelo produzido por fotogrametria, pois mesmo diante de valores moderadamente elevados, sabe-se que o sistema está sujeito a melhorias que tendem a reduzir os valores *RMSE*. Além do que a rotina de uso e o aprendizado constante agregam melhorias no processo.

Na questão tempo o Sirovision se mostrou muito mais rápido que o levantamento tradicional na fase de coleta de dados. No entanto, o processamento das informações ocorreu de maneira muito lenta, chegando ao ponto de ter que descartar alguns pares de imagens para facilitar a aquisição do modelo tridimensional (foram capturados 21

pares fotogramétricos, sendo que somente 12 foram utilizados). Embora isso possa dever-se em parte às falhas na tomada das fotos, condições de iluminação, ajuste de parâmetros e calibração das câmeras ou outras devidas à falta de prática da equipe.

Em contrapartida a utilização da fotogrametria terrestre digital, tendo como produto final um modelo digital de superfície (3D) com alta resolução espacial e radiométrica, oferece maior nível de detalhamento das informações referentes ao maciço rochoso do que o levantamento das seções por estação total. A partir desse modelo é possível extrair informações tanto do âmbito geológico (litologias, teor mineral) como, também, da mecânica de rochas (estruturas, falhas). Além disso, é possível fazer o registro sequencial das frentes de trabalho conforme vão sendo lavradas, gerando um histórico do desenvolvimento, permitindo ainda a consulta posterior da informação. Assim, essas vantagens tornam o sistema potencialmente favorável para aplicação em trabalhos de minas.

Embora os resultados apresentados tenham sido favoráveis a implantação do uso do Sirovision na rotina de trabalho da mina deve-se considerar que, em uma mina em operação ininterrupta, a agilidade de obtenção da informação é peça fundamental. Assim, pode-se prever uma futura implantação operacional tendo em vista que os softwares constituintes do sistema Sirovision estão sendo objeto de frequentes atualizações, com vistas a agilizar o processamento dos dados.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa AngloGold Ashanti pelo suporte de pessoal e equipamentos fornecidos para realização do trabalho na mina Cuiabá.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Ed. SBEE. Curitiba, Brasil: 1998. 258p.

ANGLOGOLD ASHANTI. **Relatório de Avaliação de Recursos e Reservas**. 2010, Mina Cuiabá, Sabará – MG, Brasil 2010. 16p.

BAZAN, W. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; RUY, R. S. **Calibração de um Sistema Dual de Câmeras Digitais Convergentes**. In: II Simpósio Brasileiro de Geomática, V Colóquio Brasileiro de Ciências

- Geodésicas, 2007, Presidente Prudente – SP, Brasil: 2007. 9 p.
- BRITO, J.; COELHO, L. **Fotogrametria Digital**. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, Brasil: 2002. 13p.
- CSIRO, *Sirovision user Guide – Version 2.5*. CSIRO Exploration and Mining. 2003. 8p.
- FALKNER, E.; MORGAN D. **Aerial mapping: methods and applications**. Lewis Publishers, New York, 2002. 197 p.
- FERNANDES, F. S. **Aplicação de Fotogrametria Terrestre Digital na Análise de Descontinuidade em Maciços Rochosos: Exame Comparativo com Técnicas Tradicionais**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. São Paulo, Brasil: 2010. 3p.
- GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. **Elementary surveying: An introduction to Geomatics**, Pearson Education Prentice Hall, 2008. 931 p.
- KRAAK, M. J.; ORMELING, F. **Cartography: visualization of spatial data**, Pearson Education Prentice Hall, England, 2010. 249 p.
- MOORE, D. S.; McCABE, G. P. **Introduction to the practice of statistics**. 3. ed. New York: W. H. Freeman, 1999. 825 p.
- TUCKER, D. *Sirovision Integrated Solution – Open Pit Demonstration Guide*. Datamine Software Limited. United Kingdom: 2009. 18p.
- WOLF, P. R.; DEWITT, A. B, **Elements of Photogrammetry with Applications in GIS**. McGraw-Hill, New York, 2000. 624 p.