

Isabella do Carmo Assis

Aplicação de Fotogrametria
Terrestre Digital na Amostragem de
Mina Subterrânea: Exame
Comparativo com Técnicas
Tradicionais

XIII Curso de Especialização em Geoprocessamento
2011



UFMG
Instituto de Geociências
Departamento de Cartografia
Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha
Belo Horizonte
cartog@igc.ufmg.br

ISABELLA DO CARMO ASSIS

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

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Especialista em Geoprocessamento. Curso de Especialização em Geoprocessamento. Departamento de Cartografia. Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais.

Orientador: Prof. Marcos Antônio Timbó Elmiro

BELO HORIZONTE

2011

A848a Assis, Isabella do Carmo.
2011 Aplicação de fotogrametria terrestre digital na amostragem de mina subterrânea [manuscrito] : exame comparativo com técnicas tradicionais / Isabella do Carmo Assis. – 2011.
x, 27 f. : il. (color.)

Monografia (especialização em Geoprocessamento) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2011.
Orientador: Marcos Antônio Timbó Elmiro.
Bibliografia: f. 27.

1. Fotogrametria. 2. Minas subterrâneas. I. Elmiro, Marcos Antônio Timbó. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 528

Aluno (a) Isabella do Carmo Assis

Monografia defendida e aprovada em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do título de Especialista em Geoprocessamento, em 22 de novembro de 2011, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Marcos Antônio Timbó Elmiro

Prof. MSc. Bráulio Magalhães Fonseca

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por se fazer sempre presente em minha vida mostrando-me que os obstáculos são pequenos diante de Sua força e de minha fé.

Agradeço imensamente aos meus pais Oswaldo e Nair pelo amor incondicional e incansável apoio, tornando realidade os meus anseios, ao meu irmão Lucas pela companhia durante os fins de noite que chegávamos em casa após um dia interminável e ao meu namorado Bernardo por estar sempre ao meu lado e não medir esforços para me ajudar.

Agradeço também ao meu Professor Orientador Marcos Timbó que aceitou o desafio e muito acrescentou aos meus conhecimentos, ao Professor Charles Freitas por me socorrer nas monitorias. Vocês foram peças fundamentais na realização desse estudo.

Não poderia deixar de agradecer às amigas conquistadas durante essa caminhada na UFMG não por obra do acaso, mas escolhidas a dedo por Deus. Lídia e Kelen, vocês tornaram muito mais suaves e divertidos os meus momentos de insegurança e pânico. Deixo aqui um beijo carinhoso à “Cabelinha” que mesmo dentro da barriga da mamãe Lídia marcou presença.

Estendo os meus agradecimentos à AngloGold Ashanti por ter cedido as informações e ferramentas necessárias para o estudo, em especial à toda equipe da Geologia da Mina Cuiabá que não mediu esforços para me ajudar na realização da pesquisa.

Agradeço à equipe da CAE Mining pela ajuda nos momento de aperto e pelo fornecimento das ferramentas de trabalho necessárias para análise dos dados pesquisados.

Pessoal, deixo aqui o meu muito obrigado de coração a todos vocês que tornaram a realização dessa pesquisa possível, pois como diz meu pai: “Quem tem amigo não morre pagão!”

RESUMO

A aquisição de um modelo tridimensional georreferenciado adquirido a partir da fotogrametria terrestre digital tem sido apresentada como alternativa para a realização da amostragem de canais em mina subterrânea. Porém, como se trata de tecnologia recente, se fazem necessárias análises comparativas entre os resultados obtidos a partir dos métodos tradicionais e os provenientes do meio digital. Diante disso, o objetivo deste trabalho é comparar os resultados da amostragem de canais obtidos a partir do modelo tridimensional georreferenciado e do levantamento realizado a partir da estação total, de modo a avaliar a aplicabilidade da fotogrametria terrestre digital para a amostragem em mina subterrânea e determinar sua viabilidade operacional nas condições concretas da mina. A metodologia adotada consistiu na aquisição da imagem 3D georreferenciada de uma lateral de um determinado corpo de minério e com base nessa imagem foram elaboradas, de modo digital, as seções da amostragem tendo como referência as marcações à tinta que delimitam as amostras (bigodes). Em seguida essas informações foram exportadas sendo criado um arquivo somente com as seções na posição real. O arquivo com as seções obtidas a partir do modelo tridimensional georreferenciado foi sobreposto ao arquivo gerado pelo levantamento topográfico (uso de estação total) dos mesmos bigodes marcados na parede da galeria. Essa sobreposição visou comparar o posicionamento das seções criadas a partir da imagem 3D georreferenciada e das mesmas seções levantadas por estação total, de modo a avaliar a precisão do uso da fotogrametria terrestre digital para a amostragem de mina subterrânea. A partir do estudo realizado é possível dizer que a correlação dos eixos das coordenadas X, Y e Z obtidas tanto pela estação total quanto pela fotogrametria terrestre digital foi suficientemente satisfatória, onde o coeficiente de correlação obtido variou entre 0.983 e 0.999, ocorrendo maior correlação no eixo de coordenadas X e menor no eixo Y. O RMSE variou entre 0,07m e 0,79m, sendo o menor valor no eixo X e o maior no eixo Y. Embora a aplicação da fotogrametria terrestre digital, a partir do sistema Sirovision, seja uma nova tecnologia que pode agilizar a coleta dos dados no subsolo e proporcionar maior nível de detalhes às seções da amostragem, o processamento das fotos para a criação do modelo 3D georreferenciado ainda se dá de maneira muito lenta. Outro ponto a ser considerado deve-se ao fato que em alguns pontos ocorrem falhas na estereoscopia do par de fotos, podendo comprometer a identificação litológica. Diante do exposto, se julga importante o acompanhamento *in loco*, concomitante ao uso do Sirovision.

Palavras-chave: Fotogrametria terrestre digital, sirovision, estação total, amostragem de canal, *root mean square error*, erro médio quadrático

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	x
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 - Apresentação.....	1
1.2 – Objetivos	2
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 – Fotogrametria – Conceituação Geral	3
2.2 – Fotogrametria Digital	6
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	10
3.1 – Caracterização da área de estudo	12
3.2 – Coleta dos dados de campo	12
3.3 – Processamento dos dados	14
3.4 – Elaboração dos dados de canais a partir do modelo 3D georreferenciado	15
3.5 – Método de Comparação dos dados	17
3.5.1 – Comparação visual das seções	17
3.5.2 – Cálculo estatístico do erro entre as coordenadas através do RMSE	17
3.5.3 – Cálculo da correlação linear entre as coordenadas	18
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
4.1 – Análise dos diferentes métodos usados na comparação das informações	20
4.1. 2 – Análise da comparação visual das seções	20
4.1. 3 – Análise do RMSE entre as coordenadas	21
4.1. 4 – Análise da correlação linear entre as coordenadas	22
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 – Composição do rig para mina subterrânea	2
2.1 - Dissensão inicial entre fotogrametria e sensoriamento remoto	4
2.2 - Visão atual da fotogrametria	5
2.3 - Tomada do par de fotos (esquerda e direita respectivamente) pelo rig	7
2.4 - Estrutura de pixels existente em uma imagem	8
2.5 - Distribuição matricial	9
2.6 - Parâmetros de calibração das câmeras do Sirovision	9
3.1 – Fluxograma da estrutura geral da metodologia referente ao subsolo	10
3.2 - Fluxograma da estrutura geral da metodologia referente à superfície	11
3.3 – Localização da Mina Cuiabá	12
3.4 – Associação dos conjuntos de imagens com o par usado como referência para correção das imagens	14
3.5 – Exemplo onde a restituição do par de fotos ocorreu com 86% de sucesso	15
3.6 – Modelo 3D georreferenciado. Vista em perfil	15
3.7 – Arranjo triangular da nuvem de pontos constituintes do modelo 3D.....	16
3.8 – Seções de amostragem	16
4.1 – Visão frontal das seções	20
4.2 – Visualização de perfil das seções amostradas	21
4.3 – Gráfico de dispersão das coordenadas do eixo X	23
4.4 - Gráfico de dispersão das coordenadas do eixo Y.....	24
4.5 – Gráfico de dispersão das coordenadas do eixo Z	24

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 – Desenvolvimento evolutivo cronológico da fotogrametria	7
3.1 – Coordenadas dos pontos conhecidos	13
3.2 – Interpretação dos valores do coeficiente de correlação	19
4.1 – Resultados do <i>RMSE</i> das seções e do total de pontos coletados	22

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

2D	- Duas dimensões ou bidimensional
3D	- Três dimensões ou tridimensional
ASP	- <i>American Society of Photogrammetry</i>
ASPRS	- <i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
CSIRO	- <i>Commonwealth Scientific and Industrial Organization</i>
CSV	- Extensão do arquivo do Microsoft Excel
EMQ	- Erro Médio Quadrático
IME	- Instituto Militar de Engenharia
ISP	- <i>International Society of Photogrammetry</i>
ISPRS	- <i>International Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
m	- Unidade de medida em metro
m ²	- Unidade de medida em metro quadrado
NEF	- Extensão da fotografia adquirida pelo Sirovision
Rig	- Equipamento do Sirovision desenvolvido para trabalhos em mina subterrânea
RMSE	- <i>Root Mean Square Error</i>
TIF	- Extensão das fotografias quando convertidas da extensão nef

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

No dias atuais a tecnologia tem se mostrado aliada das grandes empresas, as quais visam agilidade na obtenção da informação, concomitante à confiabilidade da mesma e a segurança dos seus colaboradores. E foi pensando nisso que a CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Organization*), instituto de pesquisa do governo australiano, desenvolveu o Sirovision.

O Sirovision é uma tecnologia desenvolvida 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) georreferenciado de alta qualidade. Sua aplicação se dá tanto para mina a céu aberto (*open pit*) quanto para mina subterrânea (*underground mine*). No entanto, o presente estudo focará nos trabalhos desenvolvidos em mina subterrânea.

O Sirovision é constituído da combinação de *hardware* e *software*, sendo:

- *Hardware*: O arranjo customizado (rig) para mina subterrânea de duas câmeras comerciais;
- *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.

O rig, equipamento desenvolvido especificamente para trabalhos em subsolo, também possui quatro pontos de lasers, flash e luzes acoplados, assim como um mono pé (Figura 1.1).



Figura 1.1 – Composição do rig 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 varia entre 3 e 5 m², de acordo com a distância do rig em relação ao local a ser fotografado. As imagens são posteriormente processadas no computador para gerar a imagem 3D georreferenciada nas coordenadas reais da mina. 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 georreferenciados sobre toda área fotografada.

Tendo em vista a potencial aplicação da fotogrametria terrestre digital em mina subterrânea 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 estação total.

1.2 Objetivos

Dentro desse enfoque, o presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a aplicabilidade da fotogrametria terrestre digital para amostragem de mina subterrânea de modo a determinar sua viabilidade operacional.

O objetivo específico detém-se a comparar os resultados da amostragem de canais obtidos a partir do modelo tridimensional georreferenciado e do levantamento realizado pela estação total, mostrando quantitativamente e ou qualitativamente as diferenças entre os métodos.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo é feita uma breve descrição da base teórica e dos conceitos gerais relacionados à fotogrametria, sendo destacada a fotogrametria terrestre digital. Será dado maior enfoque aos tópicos que tratam da importância do momento da aquisição de imagens, assim como o processamento e produto final das mesmas os quais estarão sujeitos à análise no decorrer da pesquisa. A introdução destes conceitos gerais é de suma importância para fornecer embasamento teórico e permitir a compreensão do problema e da metodologia de pesquisa abordada no presente trabalho.

2.1 – Fotogrametria – Conceituação Geral

O conceito etimológico da palavra fotogrametria advém de *photon* – luz, *graphos* – escrita e *metron* – medições, ou medições executadas através de fotografias. No entanto, esse tema foi fruto de muitas discussões ao longo do século passado, quando a fotogrametria sofreu um grande impacto com a possibilidade de obtenção de imagens multiespectrais (cobrindo diversas bandas do espectro) através de sensores digitais como câmeras digitais e varredores. Paralelamente a esse fato novas plataformas passaram a portar tais tipos de sensores, ocorrendo então, a introdução de sensores orbitais (satélites e outros veículos espaciais). Essa revolução fez com que essa ciência emergente passasse a ser chamada de Sensoriamento Remoto.

No início as imagens tinham baixa resolução geométrica devido ao não acompanhamento tecnológico dos sistemas de lentes e pela grande distância entre os satélites e superfície, fato que impossibilitou a adaptação das imagens à estrutura do processo fotogramétrico adotado. Os sistemas computacionais de processamento de imagens digitais ainda eram rudimentares para as pesadas rotinas fotogramétricas. Dessa forma a fotogrametria seguiu o seu curso anteriormente estabelecido, com foco na restituição de cartas ou mapas do terreno fotografado. Diante disso, a princípio houve informalmente uma dissensão entre fotogrametria e sensoriamento remoto (Figura 2.1).

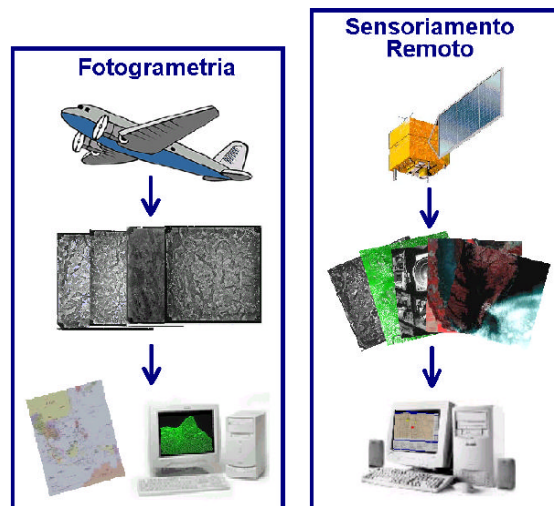


Figura 2.1 – Dissensão inicial entre fotogrametria (plataforma aérea, fotografias e produtos cartográficos) e sensoriamento remoto (plataformas orbitais, imagens digitais e vários tipos de produtos, como mapas geológicos ou florestais). Fonte: Brito e Coelho, 2002

No entanto, as associações dos profissionais de fotogrametria não seguiram esta divergência e iniciaram o estudo das imagens de sensores remotos. Tais especialistas chegaram à conclusão que não era coerente a divisão entre as duas ciências uma vez que o que estava sendo chamado de sensoriamento remoto (imagens digitais e orbitais) era uma ciência irmã do que vinha sendo chamado de fotogrametria (imagens fotográficas e aéreas). Dessa forma, foram estabelecidas algumas definições as quais refletem diferentes visões sobre o tema, assim como expressam perfis e épocas diferentes.

A ASP (*American Society of Photogrammetry*) trocou seu nome para ASPRS (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) e definiu como fotogrametria “a arte, ciência e tecnologia de se obter informação confiável sobre objetos físicos e meio ambiente, através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens e padrões de energia eletromagnética radiante e outros fenômenos.” No que diz respeito a sensoriamento remoto a única menção que a associação faz é que “técnicas de sensoriamento remoto são usadas para adquirir e processar informação sobre um objeto sem contato físico direto entre o sensor e o alvo de interesse”.

Acontecimento similar ocorreu com a ISP (*International Society of Photogrammetry*) que posteriormente veio se chamar ISPRS (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) e enunciou que “fotogrametria e sensoriamento remoto é a arte, ciência e tecnologia de se obter informação confiável de imagens de sensores imageadores e outros, sobre a Terra e seu meio ambiente, e outros objetos físicos e processos através de

gravação, medição, análise e representação.” Convém destacar a idéia de junção de fotogrametria e sensoriamento remoto em um só conceito.

Para Brito e Coelho (2002) com o desenvolvimento da fotogrametria digital e de sensores orbitais compatíveis com a atividade fotogramétrica a tendência atual é que a fotogrametria esteja inserida no contexto global de sensoriamento remoto definindo-a como *“ciência e tecnologia de se reconstruir o espaço tridimensional, ou parte do mesmo (espaço objeto) a partir de imagens bidimensionais advindas da gravação de padrões de ondas eletromagnéticas (espaço imagem), sem contato físico direto com o objeto ou alvo de interesse.”*

De acordo com Brito e Coelho (2002) a fotogrametria é considerada ciência, pois utiliza métodos científicos para o estudo do funcionamento dos processos de captação de energia eletromagnética e análise dos registros advindos dos mesmos, e também é tecnologia uma vez que torna os processos mais rápidos e eficazes para os usuários. Sendo o espaço objeto qualquer elemento ou conjunto de elementos tridimensionais a serem imageados, o sensor pode estar localizado em qualquer plataforma (Figura 2.2).

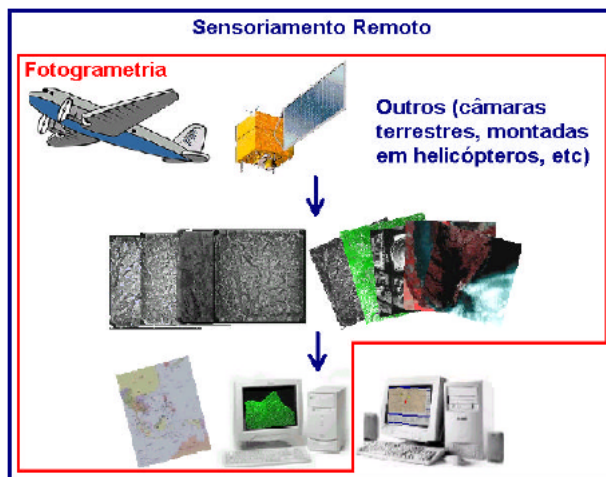


Figura 2.2 – Visão atual da fotogrametria (imagens provenientes de diferentes sensores – analógico ou digital -, gerando produtos que representem o espaço objeto). O sensoriamento remoto é mais abrangente, considerando a geração de outros tipos de produtos – mapas temáticos e imagens classificadas. Fonte: Brito e Coelho, 2002

Diante desse fato, convencionou-se usar a classificação de fotogrametria terrestre, fotogrametria aérea ou aerofotogrametria e fotogrametria orbital de acordo com o posicionamento do sensor. O foco do estudo em questão será a fotogrametria terrestre.

2.2 – Fotogrametria Digital

A fotogrametria digital teve seu surgimento nos anos 80, tendo como inovador a utilização de imagens digitais como fonte primária de dados. A imagem digital pode ser adquirida diretamente de uma câmera digital, ou mesmo da digitalização matricial de uma imagem analógica (uso do scanner). Nos anos 90, esse ramo da fotogrametria pôde ser usado de maneira extensiva devido ao desenvolvimento de computadores com capacidade suficiente para o processamento interativo de imagens digitais, gerando elevados volumes de dados.

O objetivo principal da fotogrametria é a reconstrução automática do espaço tridimensional, chamado de espaço objeto, a partir de imagens bidimensionais, chamadas de espaço imagem. Trata-se de uma transformação entre sistemas. Um sistema bidimensional, chamado sistema fotográfico e um sistema tridimensional, que representa o próprio espaço objeto. Geralmente, utiliza-se um sistema bidimensional próprio de cada câmera, com origem no centro de seu quadro, e de coordenadas determinadas por calibração em laboratório antes do uso da câmera. O sistema tridimensional representa o sistema de coordenadas do terreno sobre o qual se obteve a imagem, podendo estar representado em coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude), planialtimétricas (E, N e altitude) ou cartesianas (X, Y e Z).

Para que a transformação entre os sistemas ocorra também é necessária a locação de um conjunto de pontos de controle (pontos com coordenadas conhecidas – Figura 2.3) no objeto a ser imageado. Uma vez locados no espaço imagem, tem-se os parâmetros de entrada para a dedução da função que mapeia um sistema no outro. Quanto maior o número de pontos de controle, melhores são os resultados finais. Porém, convém avaliar até onde é viável a obtenção de muitos pontos. E foi pensando nisso que alguns processos, como por exemplo, de triangulação, foram desenvolvidos de modo que a partir de apenas alguns pontos de coordenadas conhecidas possa ser gerada uma infinidade de outros com precisões aceitáveis para serem utilizados como se de controle fossem.

Com relação às imagens, para se obter um modelo tridimensional a partir do Sirovision o número necessário é variável, sendo desejável ao menos duas (da esquerda e da direita), tomadas da mesma posição e com área de superposição de modo a viabilizar a visão estereoscópica que possibilita uma maior acurácia na restituição tridimensional do espaço objeto (Figura 2.3).

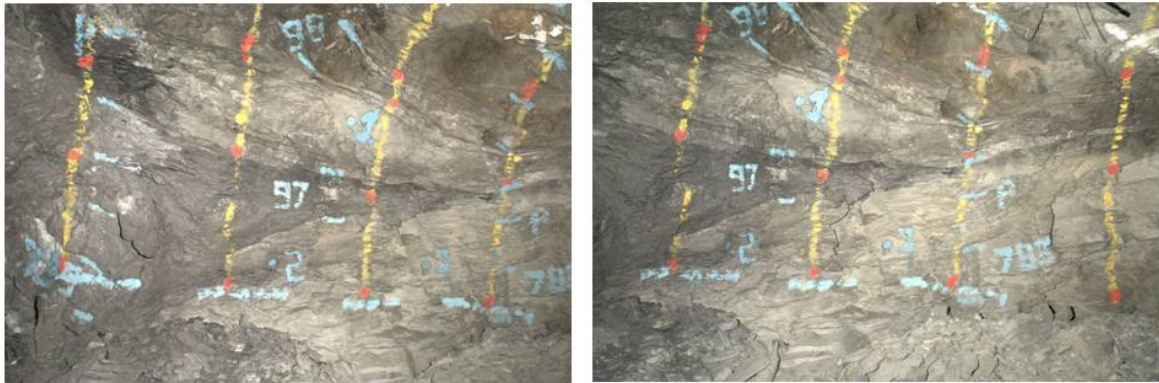


Figura 2.3 – Tomada do par de fotos em 2D (esquerda e direita respectivamente) a partir de um único disparo e do mesmo posicionamento rig. Destaque para os pontos de controle 1, 2 e 3.

A fotogrametria digital visa automatizar a fotogrametria desenvolvida ao longo dos anos, pelo princípio que os equipamentos de informática nos dias atuais permitem o rápido processamento da avalanche de dados coletados. Atualmente, pode-se dizer que o processamento se dá de maneira semi-automática, pois os processos implementados tentam ser automáticos, porém ainda se faz necessária a supervisão e eventual intervenção humana no mesmo. A Tabela 2.1 mostra o desenvolvimento evolutivo cronológico da fotogrametria.

Tabela 2.1 – Desenvolvimento evolutivo cronológico da fotogrametria.

Fotogrametria	Entrada	Processamento	Saída
Analógica	Foto analógica (em filme)	Analógico (opto-mecânico)	Analógica (<i>scribes</i> /fotolitos) no passado ou digital (CAD, por exemplo) no presente
Analítica	Foto analógica (em filme)	Analítico (computacional)	Analógica (<i>scribes</i> /fotolitos) no passado ou digital (CAD, por exemplo) no presente
Digital	Imagem digital (obtida de câmara digital, por exemplo) ou digitalizada (foto analógica submetida a um <i>scanner</i>)	Analítico (computacional)	Digital

Fonte: Augusto, 2000.

Para a obtenção das imagens utiliza-se o que se convencionou chamar de câmera fotogramétrica. Essas câmeras possuem maior rigor métrico sendo possível extrair informação métrica e precisa das imagens por elas adquiridas.

As câmeras fotogramétricas em geral são aéreas, porém podem ser terrestres (como no caso desse estudo) para a aquisição de imagens oblíquas de feições irregulares.

Com relação às imagens digitais, há basicamente dois tipos: Vetorial e matricial. A imagem vetorial é caracterizada pela delimitação de objetos pelos pontos que os determinam. Já a imagem matricial é aquela composta por pixels.

A imagem digital é uma matriz composta por células quadradas denominadas pixels, dentro dos quais há uma única coloração sólida, definida por um número digital. Na Figura 2.4 é possível observar os pixels de uma imagem, sendo melhores evidenciados quanto mais ampliada for a imagem. Por conseguinte, quanto menor o tamanho do pixel, maior será a resolução espacial da imagem digital.

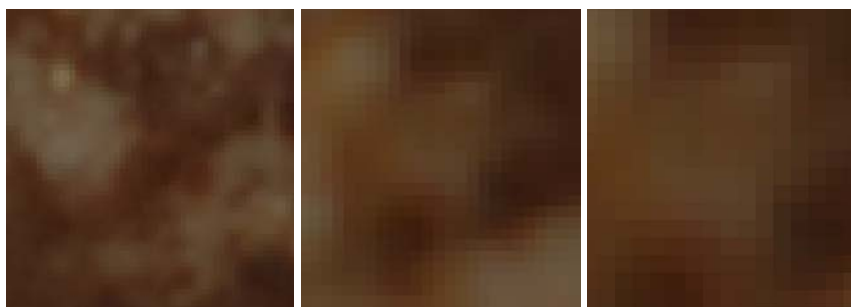


Figura 2.4 – Estrutura de pixels existente em uma imagem, sendo melhor evidenciado após ampliações.

De acordo com Brito e Coelho (2002) pode-se definir qualquer imagem digital por uma matriz, tendo por valor de cada um dos elementos o número digital equivalente. A partir da Figura 2.5 é possível um melhor entendimento.

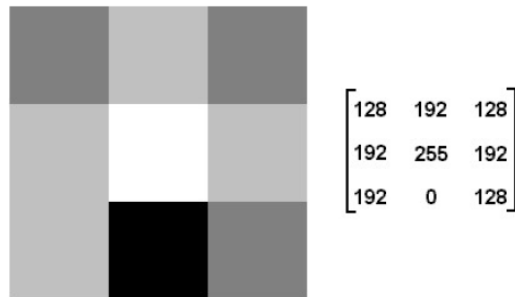


Figura 2.5 – Distribuição matricial (à direita) equivalente a um conjunto de pixels (à esquerda). Fonte: IME, 2002.

Na Figura 2.5 é possível perceber diferentes tons de cinza. E é essa capacidade de discernimento dos tons que chamamos de resolução radiométrica, sendo ela tanto maior quanto maior os níveis de cinza.

Para o trabalho em questão, onde as imagens foram obtidas a partir do método fotogramétrico terrestre, é de suma importância que as mesmas tenham alta resolução tanto radiométrica como espacial, uma vez que serão utilizadas para obtenção de informações geológicas numa escala de grande detalhamento.

No entanto, o fator primordial a ser avaliado será com relação às coordenadas das informações referentes às seções de amostragem. As câmeras métricas utilizadas pelo Sirovision visam uma maior rigidez em suas coordenadas, além de contar com os parâmetros já definidos em um certificado de calibração. (Figura 2.6). Os parâmetros encontrados no 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.

```

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

```

Figura 2.6 – Parâmetros de calibração das câmeras (esquerda e direita) do Sirovision. Fonte: CSIRO, 2006.

Tendo como base a teoria abordada até o momento, no próximo capítulo serão descritos os procedimentos adotados para o desenvolvimento da pesquisa.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Os fluxogramas das Figuras 3.1 e 3.2 apresentam a estrutura geral da metodologia utilizada para atingir os objetivos do trabalho. Cada tópico, assim como os detalhes importantes para sua viabilização, serão brevemente abordados.

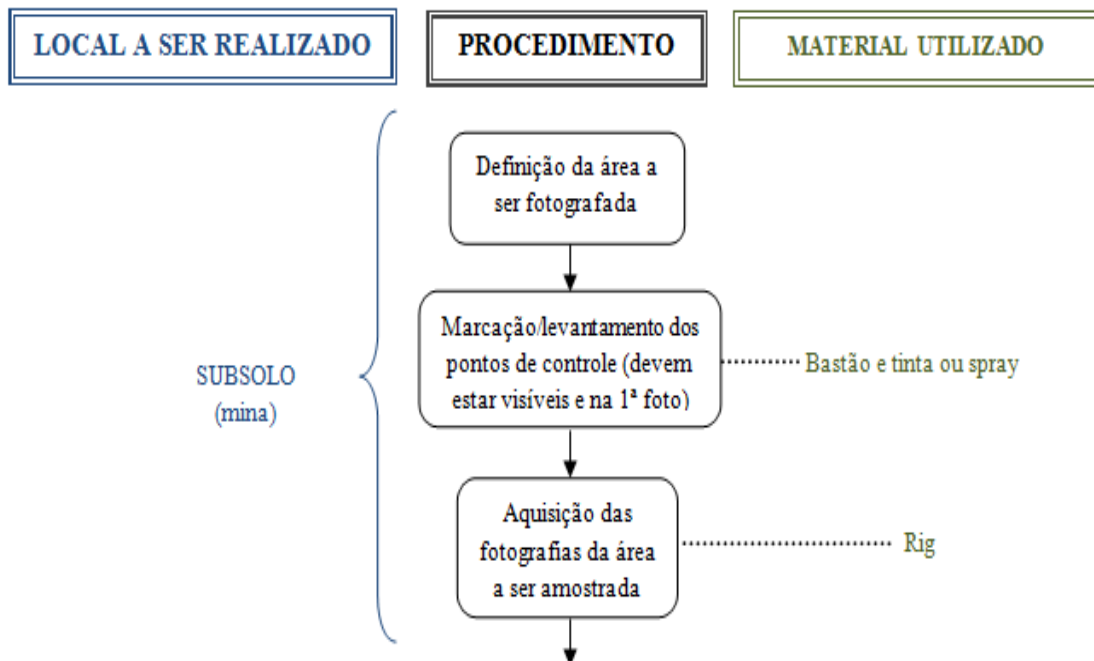


Figura 3.1 - Fluxograma da estrutura geral da metodologia referente ao subsolo.

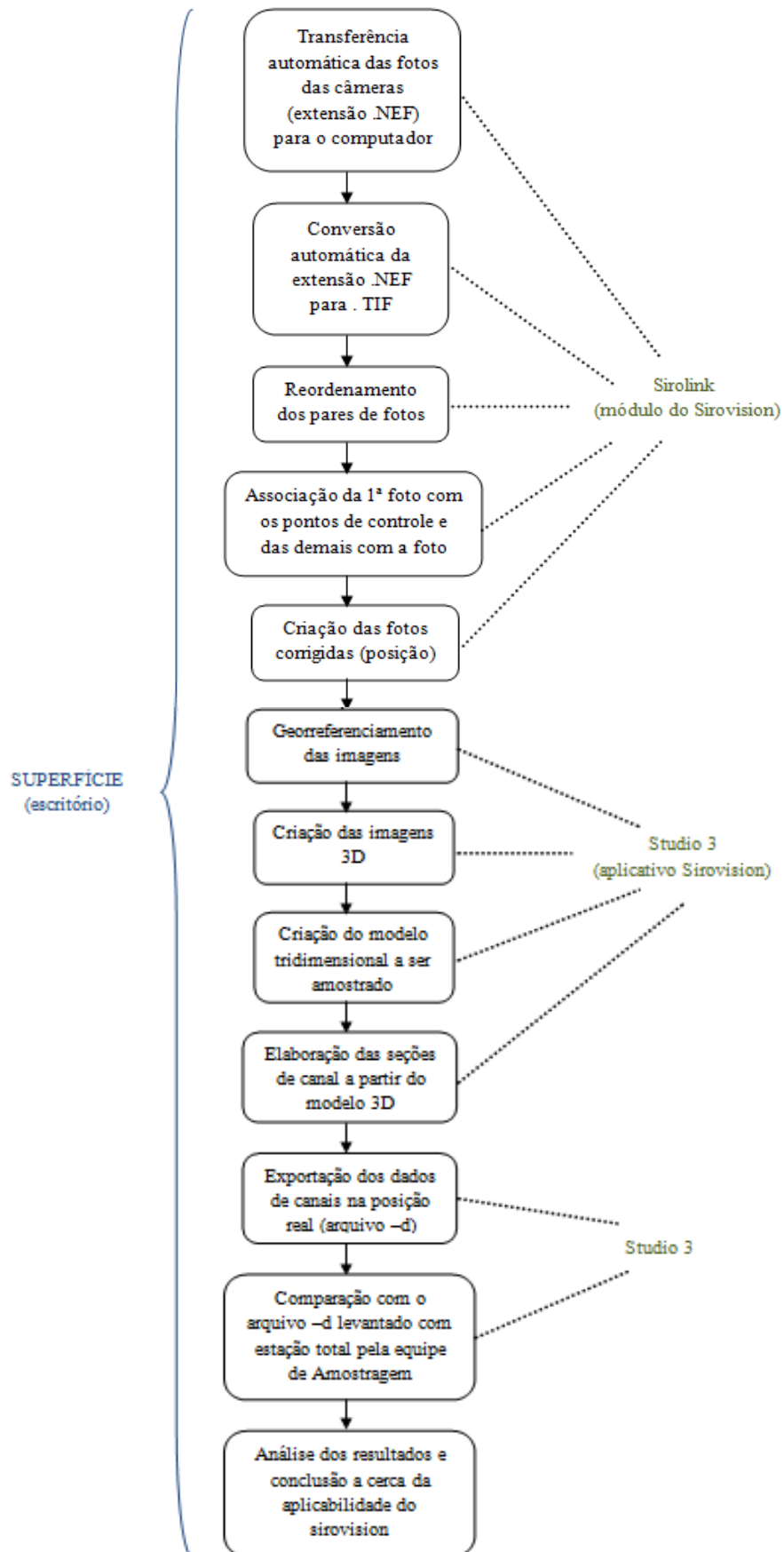


Figura 3.2 - Fluxograma da estrutura geral da metodologia referente à superfície.

3.1 Caracterização da área de estudo

A área objeto do estudo fica na Mina Cuiabá, mina subterrânea, de propriedade da AngloGold Ashanti. Essa mina está localizada no Quadrilátero Ferrífero, na cidade de Sabará e tem como principal atividade a extração de ouro (Figura 3.3).

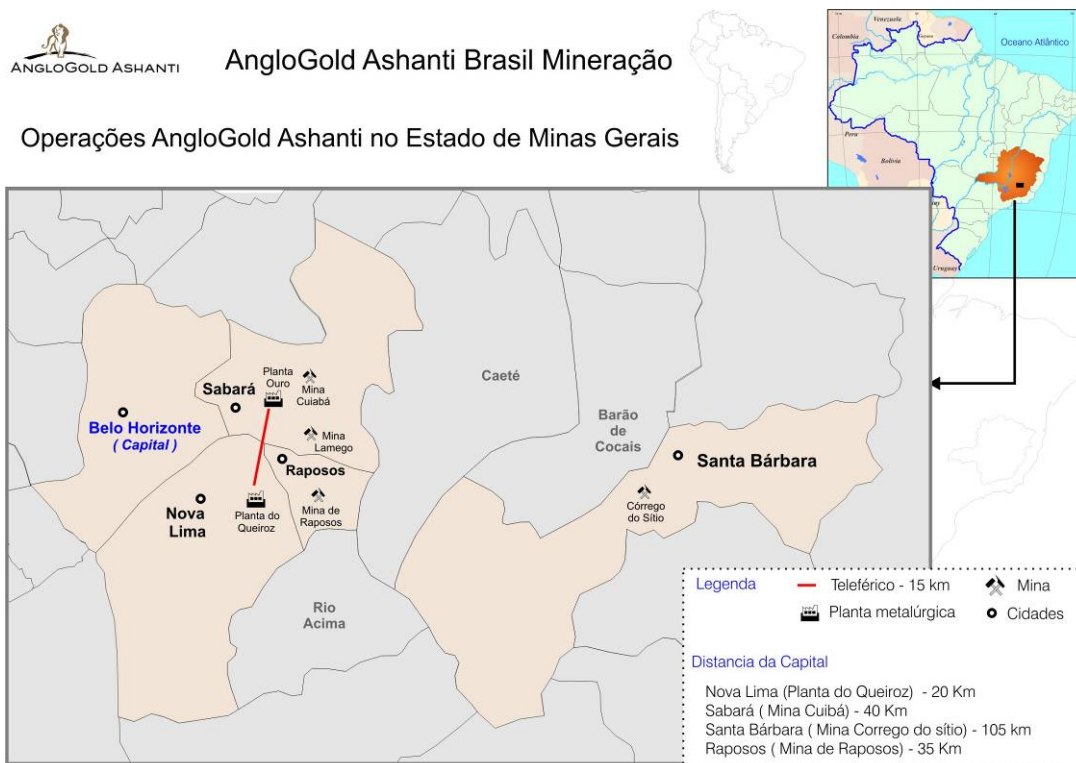


Figura 3.3 – Localização da Mina Cuiabá. Fonte: Relatório Anual Interno (2010).

3.2 – Coleta dos dados de campo

Atualmente a mina encontra-se com aproximadamente 1100 metros de profundidade, divididos em 16 níveis onde já ocorrem trabalhos e é estruturada em diferentes corpos de minério, definidos de acordo com o comportamento litológico.

Os dados de campo utilizados no trabalho foram coletados no subsolo da Mina Cuiabá, no nível 8 do corpo de minério conhecido como Balancão.

Por se tratar de uma análise comparativa entre os mesmos dados obtidos por técnicas diferentes, teve-se o cuidado 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, 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*, conhecido como rig, para aquisição de fotos em subsolo. Esse equipamento é composto por duas câmeras digitais reflex da marca Japonesa Nikon, modelo D200 com objetiva de 20 milímetros, e também por quatro pontos de lasers, flash e luzes acoplados, assim como um mono pé.

Após definida a área a ser amostrada a equipe responsável realizou o levantamento dos canais com 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 (1,2 e 3) 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 Suíça *Leica Geosystems* (Tabela 3.1), onde Z é a altitude com relação ao nível do mar. Essas coordenadas (expressas em metros) estão no sistema local utilizado na mina, o qual tem o ponto M-4, localizado no *open pit*, como marco topográfico (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Coordenadas dos Pontos Conhecidos

PONTOS CONHECIDOS	COORDENADAS		
(pontos de controle)	X	Y	Z
M-4	93045,01200	91293,10800	
1	-92422,80000	-91266,80000	515,07000
2	-92421,70000	-91267,20000	516,00400
3	-92420,40000	-91266,10000	514,81600

As coordenadas levantadas pela estação total foram processadas em superfície com a utilização do software *Topograph* e salvas em um arquivo *csv* a ser utilizado posteriormente no georreferenciamento das imagens.

A aquisição dos doze pares estereoscópicos, sendo cada seção vertical com três pares, teve como ponto de partida a área onde os três pontos de controle estavam concentrados, de modo que eles fossem capturados no primeiro par de fotos. O levantamento das imagens foi feito da esquerda para a direita seguindo a numeração crescente das seções da amostragem (BBAC267496 a BBAC267520).

3.3 – Processamento dos dados

Terminado o levantamento e já em superfície, as fotografias foram transferidas para o computador utilizando software Sirolink (módulo do sistema Sirovision) e automaticamente convertidas de *nef* para *tif*. 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 *csv* com as coordenadas dos pontos, e os demais pares com o anterior (Figura 3.4) para que seja feita a correção das imagens. Na figura a seguir observam-se os pontos de controle no primeiro conjunto de fotos, o qual será referência para o segundo e o terceiro terá o segundo como referência.

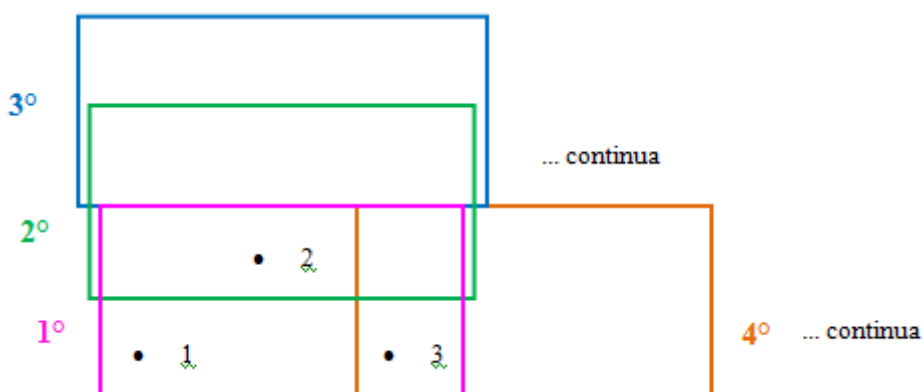


Figura 3.4 – Associação dos conjuntos de imagens com o par usado como referência para correção das imagens

No processo de correção das imagens as distorções são removidas conforme os parâmetros da câmera citados anteriormente, onde o *software* utiliza também as informações de coordenadas dos pontos de controle 1, 2 e 3 para definir as coordenadas de todo ponto constituinte das imagens. Sendo assim, a partir desse ponto as imagens estão individualmente corrigidas e georreferenciadas.

Na próxima etapa e já no software Studio 3 da empresa CAE Mining são criadas imagens 3D. Nesse momento executa-se a sobreposição das fotos da câmera da direita e da esquerda para a geração de uma só imagem tridimensional. O resultado da sobreposição do par de fotos é apresentado em número percentual de pontos que foram restituídos corretamente, sendo que as áreas onde a restituição não ocorreu com sucesso serão representadas na imagem com buracos ou borrões (Figura 3.5). Isso pode ocorrer em lugares com presença de material litológico não tão coeso.



Figura 3.5 – Exemplo onde a restituição do par de fotos ocorreu com 86% de sucesso

No final do procedimento de restituição é gerado o modelo tridimensional georreferenciado a partir dos doze pares de fotos estereoscópicas (Figura 3.6). 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.

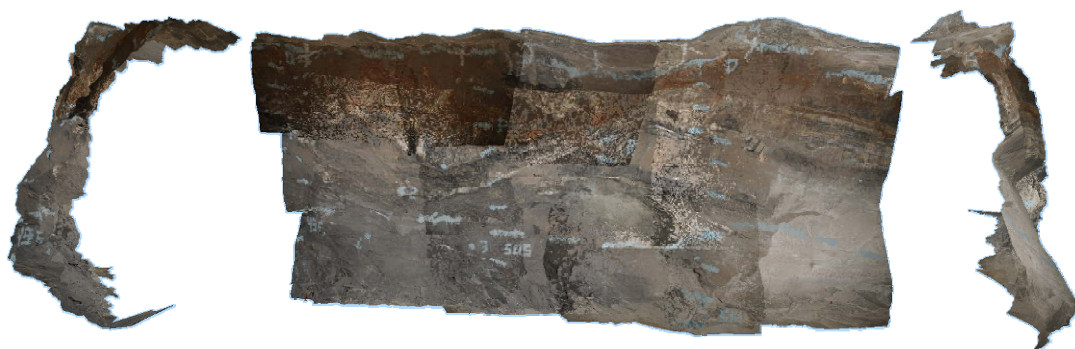


Figura 3.6 – Modelo 3D georreferenciado. Vista em perfil (da esquerda para a direita), frontal e em perfil (da direita para a esquerda), respectivamente.

3.4 – Elaboração dos dados de canais a partir do modelo 3D georreferenciado

O modelo 3D georreferenciado é constituído por uma nuvem de pontos arranjados espacialmente através da triangulação, onde cada ponto tem sua posição definida pelas coordenadas X, Y e Z (Figura 3.7).

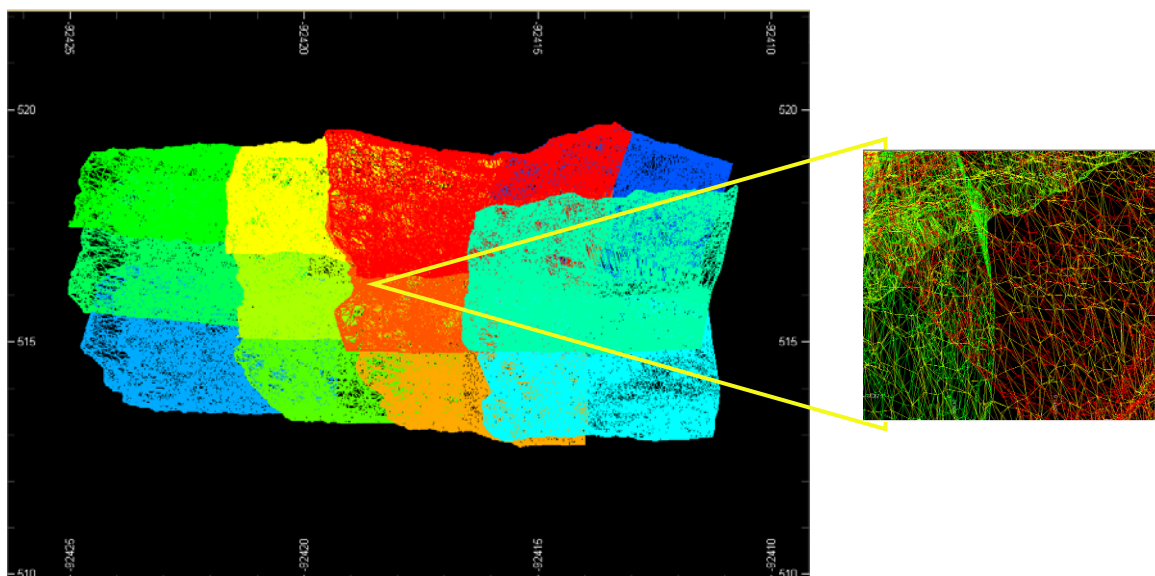


Figura 3.7 – Arranjo triangular da nuvem de pontos constituintes do modelo 3D. Cada coloração corresponde a um par de fotos.

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.

Sendo assim, com a imagem 3D carregado no Studio 3 elaborou-se um arquivo com seis seções na posição real. As seções, em amarelo, foram criadas ligando os pontos, conhecidos como bigodes, marcados com tinta azul na parede da galeria pela equipe de amostragem (Figura 3.8).

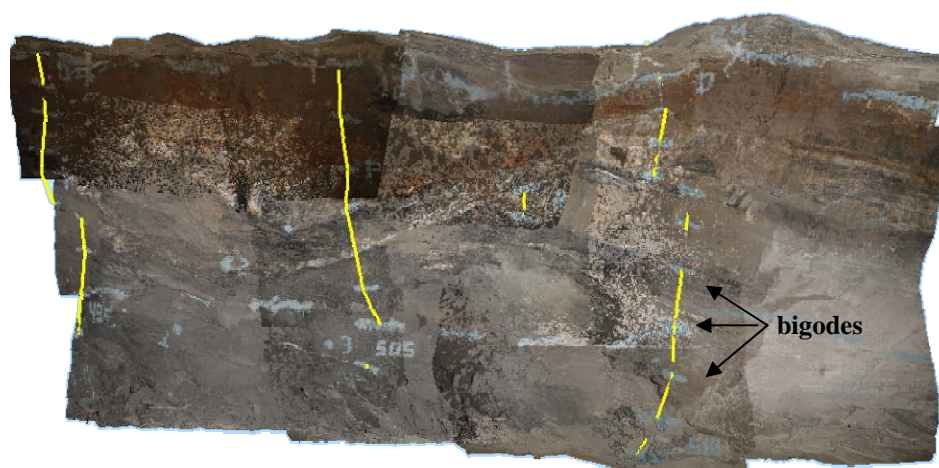


Figura 3.8 – Seções de amostragem

Uma vez elaborado, o próximo procedimento é a comparação do posicionamento das seções adquiridas pela estação total e pelo Sirovision.

3.5 – Método de Comparação dos dados

Para tecer uma análise conclusiva confiável sobre a viabilidade de aplicação do Sirovision para amostragem em mina subterrânea faz-se necessária a comparação detalhada das informações obtidas.

Diante disso, 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. Esses métodos são discutidos no decorrer dos tópicos a seguir.

3.5.1 – Comparação visual das seções

A primeira forma de comparação entre os arquivos adquiridos por métodos diferentes foi a visual. O arquivo cujas seções foram 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, levando em consideração o início e fim de cada seção.

3.5.2 – Cálculo estatístico do erro entre as coordenadas através do RMSE

A análise visual não é suficiente para se chegar a uma conclusão a cerca da qualidade e confiabilidade da informação fornecida pelo Sirovision.

Dessa forma, outro método adotado foi o *Root Mean Square Error (RMSE)*, também conhecido como Erro Médio Quadrático (EMQ), como medida estatística da magnitude do erro. 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 fórmula do RMSE usada para comparação dos resultados é dada por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum^n (E - S)^2}{n}} \quad (3.1)$$

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 de pontos da mesma seção.

Para fim de análise do RMSE quanto menor o valor obtido a partir da utilização da fórmula descrita maior é a relação entre as coordenadas.

A comparação entre as coordenadas foi feita de maneira separada entre os eixos, ou seja, comparou-se o eixo X do arquivo da estação total com o eixo X do arquivo do Sirovision e em seguida foi feito o mesmo procedimento para os eixos Y e Z.

3.5.3 – Cálculo 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 com aqueles adquiridos pelo Sirovision. O coeficiente de correlação (r) é calculado com base na fórmula:

$$r = \frac{\sum (E_i - \bar{E}) * (S_i - \bar{S})}{\sqrt{\left[\sum (E - \bar{E})^2 \right] * \left[\sum (S_i - \bar{S})^2 \right]}} \quad (3.2)$$

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.

O coeficiente de correlação mede o grau de associação linear entre duas variáveis e está sempre dentro de -1 e +1. Os valores sendo negativos se a variável E diminuir a variável S também diminui e sendo positivos se E aumenta a variável S também aumenta.

Para r igual a +1 significa dizer que há uma perfeita associação positiva entre as variáveis. Para r igual a -1 há uma perfeita associação negativa entre as variáveis. E se r igual a 0 (zero) não há correlação linear entre as variáveis (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Interpretação dos valores do coeficiente de correlação

Valor de ρ (+ ou -)	Interpretação
0.00 a 0.19	Uma correlação bem fraca
0.20 a 0.39	Uma correlação fraca
0.40 a 0.69	Uma correlação moderada
0.70 a 0.89	Uma correlação forte
0.90 a 1.00	Uma correlação muito forte

Fonte: Notas de aula de Estatística do Professor Sérgio Faria (2011)

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 de regressão calculada pela fórmula:

$$S_{(est)} = a + b * E \quad (3.3)$$

Onde,

a é o interceptor sobre o eixo “y” (valor de S quando E é zero);

b é o responsável pela 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 representados 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 diferentes levantamentos.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio da aplicação dos métodos abordados nos tópicos do Capítulo 3, acompanhados das discussões e análises relativas a cada etapa de trabalho. Essas análises e discussões de resultados irão fornecer as bases para diversas inferências e consolidação das conclusões do trabalho.

4.1 – Análise dos diferentes métodos usados na comparação das informações

A análise da qualidade e confiabilidade das informações obtidas pela fotogrametria terrestre digital a partir do uso do Sirovision teve como ponto referencial os dados coletados através 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.

4.1. 2 – Análise da comparação visual das seções

Para analisar a qualidade de sobreposição das seções foi preciso levar em consideração os diferentes ângulos de visualização espacial, pois dessa forma foi possível observar as diferenças na altura, profundidade e inclinação das seções.

Conforme observado na Figura 4.1 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 semelhança entre a posição, o formato e a altura principalmente entre as seções 1, 3 e 5. Com relação à seção 2 foi possível observar semelhança na posição entre os primeiros pontos, mas as seções 4 e 6 estão deslocadas e não chegaram a se tocar.

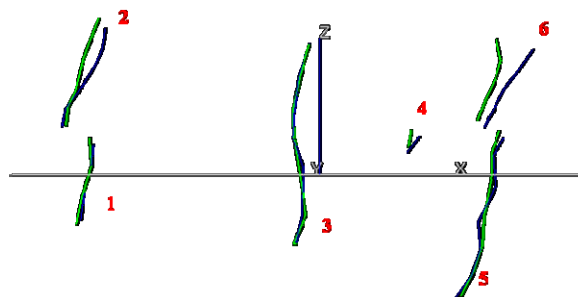


Figura 4.1 – Visão frontal das seções (azul = estação total e verde = Sirovision)

Na Figura 4.2 onde as seções estão em perfil foi possível observar a diferença na profundidade e na inclinação principalmente entre as seções 4, 5 e 6. As seções 1 e 2 e 3 estão em melhor nível de sobreposição, salvo em alguns trechos onde pode ter ocorrido aprofundamento da parede rochosa.

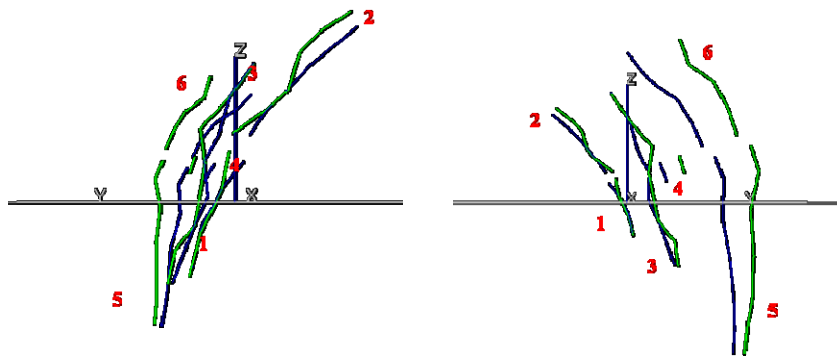


Figura 4.2 – Visualização de perfil das seções amostradas (visão da esquerda para a direita e da direita para a esquerda, respectivamente - azul = estação total e verde = Sirovision)

De modo geral o posicionamento das seções obtidas através da fotogrametria terrestre digital foi satisfatório, pois foi possível obter informações pelo uso de um modelo tridimensional digital bem próximo dos dados coletados *in loco* pelo uso da estação total.

4.1.3 – Análise do RMSE entre as coordenadas

O *RMSE*, também conhecido como erro médio quadrático (EMQ) foi calculado individualmente para cada seção, levando em consideração o número de ponto da mesma e também o mesmo eixo de coordenada, 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 4.1 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.

Para fins de comparação, uma vez que o *RMSE* trata da medida estatística da magnitude do erro, quanto menor o valor obtido maior é a relação entre as coordenadas. Sendo assim,

pode-se afirmar 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 4.1).

Analisando as seções individualmente observa-se que as seções 1 e 2 apresentaram, de modo geral, os menores valores nos três eixos de coordenadas o que reforça a análise espacial favorável feita anteriormente (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – 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
TOTAL	0.15206	0.42210	0.24364

A partir da análise da tabela anterior acredita-se que os resultados de *RMSE* obtidos são favoráveis à aplicação da fotogrametria terrestre digital na aquisição de informações para amostragem, partindo do princípio que um erro de aproximadamente 0.8m (maior erro obtido – eixo Y) não seria tão significativo para uma área amostrada de 30m (área contemplada pelo estudo).

4.1. 4 – Análise da correlação linear entre as coordenadas

A correlação linear mede o grau de associação entre as coordenadas X, Y e Z adquiridas pela estação total com aquelas adquiridas pelo Sirovision e o coeficiente de correlação varia entre -1 e +1. Com relação à linha de regressão, quanto mais próximos dela estão os pontos representados no diagrama maior é a correlação entre os valores de coordenadas obtidos tanto pela estação total como pelo Sirovision.

Com base na análise dos gráficos de dispersão apresentados a seguir (Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.5) 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 4.3). Valor esse que comprova uma correlação muito forte (Tabela 3.2) conforme já analisado nos métodos apresentados anteriormente.

A menor correlação entre as coordenadas, como ocorrido nos outros métodos de comparação, ocorreu no eixo Y, onde o coeficiente de correlação é de 0.983 (Figura 4.4). No entanto, conforme Tabela 3.2 apresentada no Capítulo 3, esse valor ainda é considerado como sendo de alta correlação.

O eixo Z apresentou o coeficiente de correlação igual a 0.992, o que significa também uma alta correlação entre as coordenadas (Figura 4.5).

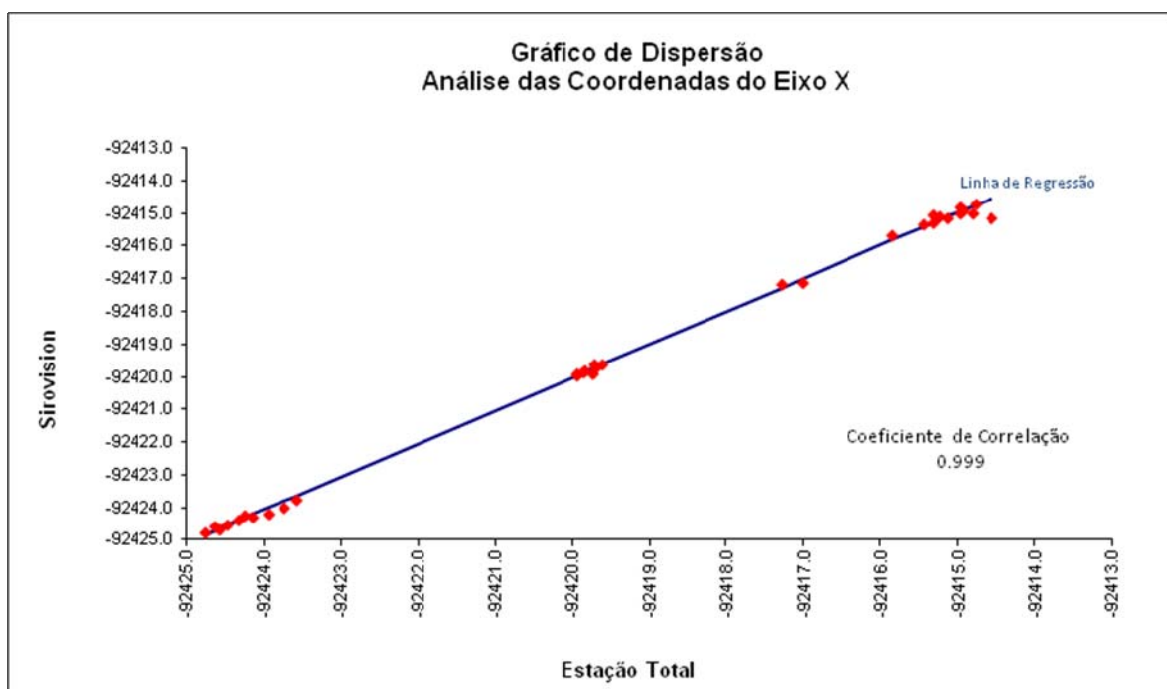


Figura 4.3 – Gráfico de dispersão das coordenadas do eixo X

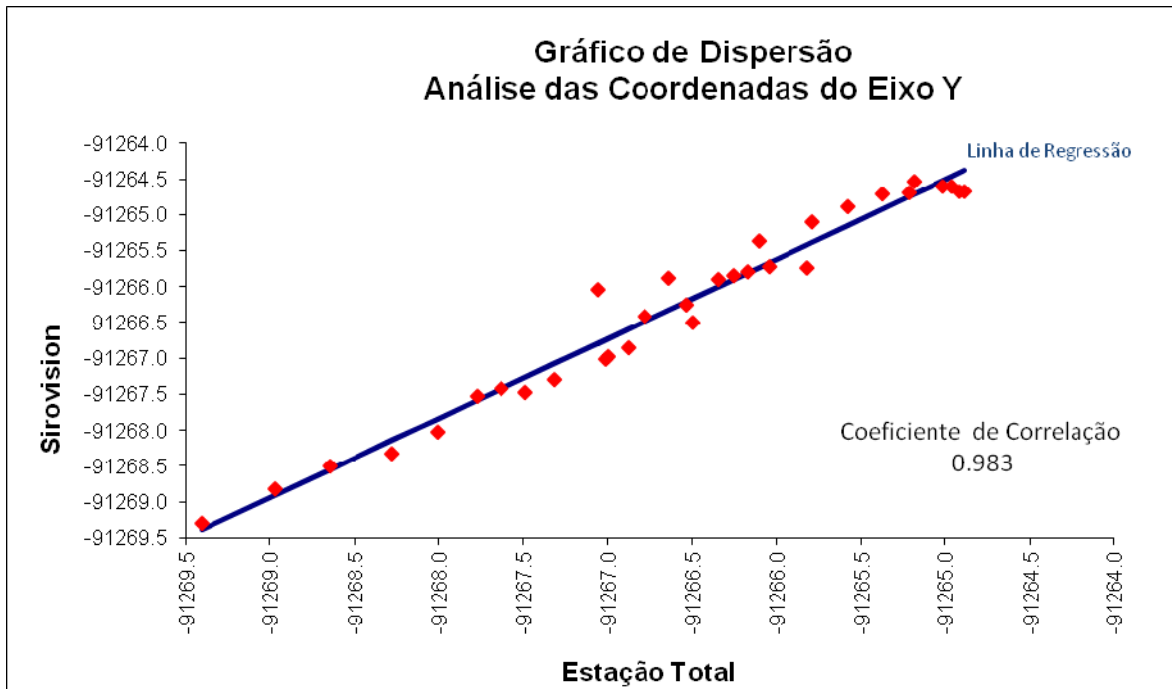


Figura 4.4 - Gráfico de dispersão das coordenadas do eixo Y

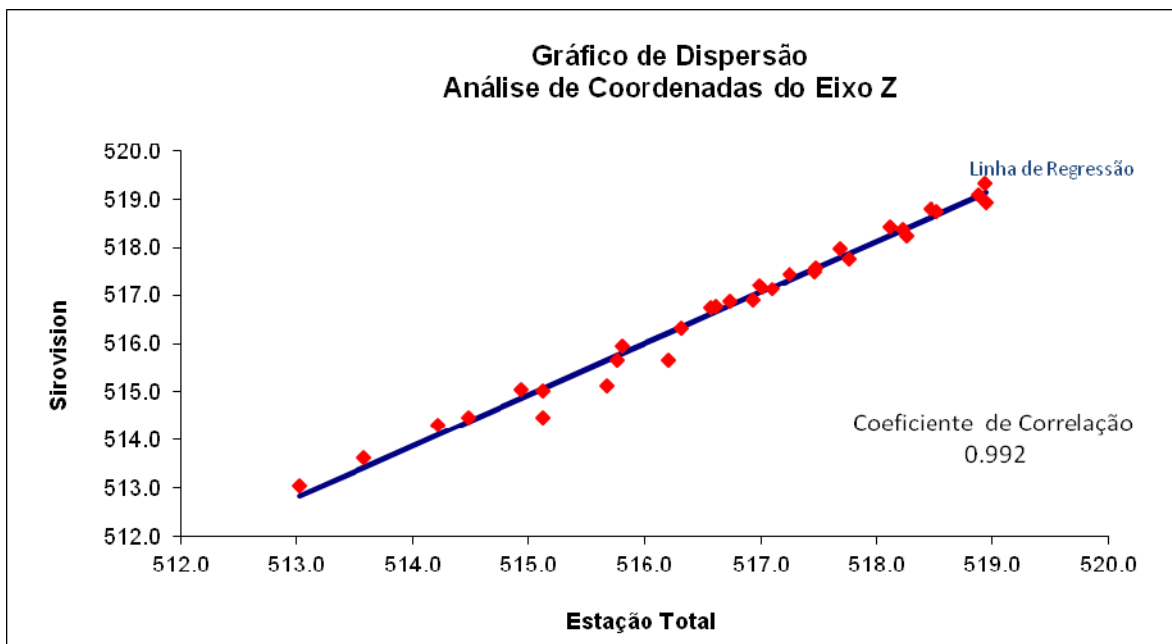


Figura 4.5 – Gráfico de dispersão das coordenadas do eixo Z

Com base nos resultados do coeficiente de correlação obtidos para as coordenadas X, Y e Z pode-se afirmar que as informações geradas a partir da fotogrametria terrestre digital através do Sirovision possuem alta correlação linear com as informações advindas do uso da estação total, uma vez que os valores obtidos estão dentro da faixa de forte correlação e muito próximo de +1 (valor que indica perfeita associação positiva entre as variáveis).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo aqui 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 em confronto com os dados obtidos a partir de um modelo tridimensional georreferenciado. Esse modelo foi gerado através de técnicas da fotogrametria terrestre digital através do uso do sistema Sirovision.

Por se tratar de uma nova técnica foi necessária a validação das informações obtidas tendo como base os dados de seções adquiridos pelo método tradicional de levantamento por estação total utilizado na mina onde o estudo foi realizado.

De maneira geral os resultados obtidos com o uso do modelo 3D georreferenciado foram considerados semelhantes àqueles adquiridos pela estação total.

Isso pode ser comprovado pelos altos valores do coeficiente de correlação entre as coordenadas dos eixos X, Y e Z de ambos os métodos de aquisição das informações. Os valores são próximos ao +1, valor que indica perfeita associação positiva entre as variáveis.

Os baixos resultados de *RMSE* afirmam mais uma vez a qualidade das informações provenientes do modelo 3D quando comparadas àquelas adquiridas pela estação total, uma vez que quanto menor o *RMSE* maior é a relação entre as coordenadas.

Mesmo diante das informações apresentadas até o momento é importante ressaltar a questão tempo quando se trata do uso do Sirovision. No que se refere à coleta de dados ele se mostrou muito mais rápido que o levantamento tradicional. No entanto, o processamento das informações se deu de maneira muito lenta e trabalhosa, chegando ao ponto de ter que descartar alguns pares de imagens no intuito de facilitar a aquisição do modelo tridimensional (foram capturados 21 pares fotogramétricos, sendo que somente 12 foram utilizados).

Em contrapartida a utilização da fotogrametria terrestre digital com o produto final sendo um modelo tridimensional georreferenciado oferece maior nível de detalhamento das

informações referentes ao maciço rochoso que o levantamento das seções por estação total. A partir da análise e estudo detalhado desse modelo é possível extrair informações do âmbito geológico (litologias, teor mineral) como também da mecânica de rochas (estruturas, falhas). Além disso, é possível fazer o registro seqüencial das frentes de trabalho conforme vão sendo lavradas, gerando um histórico do desenvolvimento, permitindo ainda a consulta posterior da informação.

Embora os resultados apresentados tenham sido favoráveis a implantação do uso do Sirovision na rotina de trabalho onde o estudo foi realizado há que se considerar que em uma mina em operação ininterrupta a agilidade de obtenção da informação é peça fundamental.

Diante disso, acredita-se ser possível uma futura implantação quando os softwares constituintes do sistema Sirovision sofrerem atualizações, com vista a agilizar o processamento dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, J.B. de, **Fotogrametria**. Ed. SBEE. Curitiba, Brasil: 1998.
- Augusto, E. G. G. **Fotogrametria Analógica – Notas de Aula**. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, Brasil: 2000.
- Brito, J.; Coelho, L. **Fotogrametria Digital**. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, Brasil: 2002.
- 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.
- Novo, E. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. Ed. Edgard Blücher. 2ª Ed. São Paulo, Brasil: 1992.
- Macedo, R. C.; Soares, J. V.; Santos, J. R. **Validação de modelo digital de terreno em área florestal com relevo ondulado, gerado a partir de dados LiDAR**. In: XV Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba - PR. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, Brasil: 2011
- 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.
- AngloGold Ashanti. **Relatório de Avaliação de Recursos e Reservas**. 2010, Mina Cuiabá, Sabará – MG, Brasil 2010.
- Tucker, D. **Sirovision Integrated Solution – Open Pit Demonstration Guide**. Datamine Software Limited. United Kingdom: 2009
- CSIRO, **Sirovision user Guide – Version 2.5**. CSIRO Exploration and Mining. 2003.