

Integração de Dados LIDAR com Imagens de Câmaras Digitais de Pequeno Formato para Extração de Informações Geológicas

Dr. Álvaro Muriel Lima Machado ¹
Prof. Dr. Edson A. Mitishita ¹
Prof. Dr. Sidnei Pires Rostirolla ²
Prof. Msc. Fernando Mancini ²
Doutorando Eduardo Mezzomo ²

¹ Universidade Federal do Paraná
Departamento de Geomática
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
alvaroml@ufpr.br; mitishita@ufpr.br

² Universidade Federal do Paraná
Departamento de Geologia
Curso de Pós-Graduação em Geologia
rostirolla@ufpr.br; ferman@ufpr.br; edumezzomo@hotmail.com

RESUMO: A natureza complementar das informações provenientes de varredura laser e de imagens digitais têm sugerido a sua combinação. Neste trabalho procura-se integrar estas duas fontes de informações para fins de extração de informações de atitudes de planos de fraturas geológicas. Após a calibração da câmara digital de pequeno formato, obtém-se os parâmetros de orientação exterior da imagem tomada, via reconhecimento de pontos pré-sinalizados na imagem de intensidade do laser. A imagem tomada é reamostrada no espaço imagem isento de distorções, e os pontos laser são projetados sobre a mesma, garantindo o georreferenciamento de todos os pixels, e permitindo o processo de monorrestituição sem iterações. As atitudes, ângulos de azimute e mergulho, são obtidas manualmente ou automaticamente a partir desta imagem sem distorções. Os procedimentos mostraram-se promissores revelando informações difíceis de serem adquiridas diretamente em campo.

Palavras chaves: Monorrestituição, Calibração de Câmaras, LIDAR, Câmara Digital, Integração.

ABSTRACT: The complementary nature of informations supplied by LIDAR raw data and image data suggests their integration. In this work both of these sources are used with the intention of acquiring geological information (fractures attitude). After the camera calibration, the exterior orientation parameters are determined by recognizing some pre-signalized points in laser intensity image. The image acquired is resampled eliminating its distortion, and all laser points are projected over this image. At this moment all pixels are georeferenced and one may use monorestitution without iterations. The attitudes are acquired automatically or manually from this no-distorted image. The procedures are satisfactory, giving informations that are difficult to get in real world.

Keywords: Monorestitution, Camera Calibration, LIDAR, Digital Camera, Integration.

1 Introdução

Segundo Paciullo, as estruturas geológicas são formadas por superfícies planas e curvilineares (ex. acamamento, foliações, planos de falhas e fraturas, dobras) e feições lineares (ex. lineações e eixos de dobras). Sendo figuras geométricas, seus registros são feitos através da descrição de suas formas (aparência) e posições espaciais em relação a coordenadas geográficas, usualmente o Norte geográfico ou verdadeiro (localização e atitude).

A atitude de um plano ou linha (ex. acamamento, eixo de dobra) é o seu posicionamento espacial em relação a uma coordenada geográfica ou magnética. Assim, através de simbologia apropriada, é possível representar qualquer estrutura num mapa geológico. A atitude é definida conhecendo-se dois ângulos: um horizontal, que posiciona planos e linhas em relação às coordenadas geográficas ou magnéticas, e outro vertical, que os posiciona na horizontal, na vertical, ou inclinados. Para o primeiro, direção (*strike*) é o termo usado quando se trata de planos estruturais e rumo (*trend*) quando se trata de linhas. Para o ângulo vertical, sempre medido numa seção perpendicular a sua direção, ângulo de mergulho (*dip*) é o termo usado para planos estruturais, e caimento (*plunge*) para linhas (ver Marshak e Mitra, 1988).

O estudo geológico de uma área requer, entre outros procedimentos, a análise das atitudes estruturais (ângulos de azimute e mergulho de planos) destas figuras geométricas porventura existentes na área enfocada. Na prática, as observações de tais atitudes ficam restritas aos locais de fácil acesso, verificando-se, eventualmente, erros sistemáticos devido à falta de generalidade nas observações. Para eliminar esta deficiência pensou-se em tomar as medidas necessárias em laboratório, sugerindo-se a integração de dados oriundos de varredura laser com imagens de câmara digital de pequeno formato.

Os dados da varredura laser garantem observações georreferenciadas de alta resolução e qualidade, e as imagens digitais permitem a visualização do ambiente de estudo. A natureza complementar destas duas fontes de informações tem sido amplamente reconhecida, e sua combinação tem sido sugerida pelos pesquisadores há vários anos (Fritsch e Kilian, 1994; Haala, 1994). Esta sugestão tem sido reiterada mais recentemente (Ackermann, 1999; Axelsson, 1999; Baltsavias, 1999; Csathó et al., 1999; Fritsch, 1999; Haala, 1999; Haala e Anders, 1997; Toth e Grejner-Brzezinska, 1999; Vosselmann, 1999).

A grande quantidade de informações provenientes dos sistemas LIDAR orienta as pesquisas mais recentes no sentido de sua utilização, muito embora existam ainda poucas aplicações capazes de manusear modelos 3D complexos, a partir desta massa de dados. Neste trabalho, o laser scanner utilizado foi o HDS-3000 da Leica Geosystems, apropriado para varreduras terrestres, com campo de visão máximo de 360° x 270° (horizontal x vertical). As coordenadas tridimensionais de trabalho são locais, com a origem do sistema na posição ocupada pelo equipamento (ou trasladado para um ponto qualquer definido). O HDS-3000 apresenta uma câmara de baixa resolução integrada, fornecendo uma imagem de baixa qualidade (1000pixels x 1000pixels) apenas suficiente para a percepção aproximada dos objetos escaneados.

A câmara digital não fotogramétrica de pequeno formato empregada foi a Sony DSC-F828, com resolução de 8Mb (3264pixels de largura x 2448pixels de altura). O tamanho do CCD interno é de 8,8mm x 6,6mm, resultando um pixel quadrado (grade regular) de 2,7micrometros de lado. Esta câmara permite zooms ópticos de até 8x. Para não se variar a distância focal selecionou-se ajuste manual e pré-fixou-se o zoom óptico em 1,2x. Sua calibração foi efetuada através da tomada de 12 fotos convergentes de uma parede no Centro Politécnico da UFPR, contendo cerca de 45 pontos com coordenadas conhecidas. O modelo matemático adotado foi o fotogramétrico tradicional (deslocamento de ponto principal, distorção radial e distorção descentrada).

A câmara da Sony DSC-F828 apresenta pequena distorção, considerando-se que não se trata de equipamento fotogramétrico. Seus parâmetros de calibração são apresentados na Tabela 1, onde:

f = distância focal (mm)

x_p, y_p = coordenadas de translação do ponto principal (mm)

K_1 = parâmetro de distorção radial

Tabela 1 - Parâmetros de Calibração (OI) da Câmera Sony DSC-F828

PARÂMETROS OI	SONY DSC-F828	Desvio-Padrão
Distância Focal	12,885	0,014
x_p	-0,010	0,006
y_p	0,015	0,006
K_1	1,02240002E-4	0,18791535E-4

Os parâmetros K_2, K_3 , de distorção radial, e P_1, P_2 , de distorção descentrada, não foram apresentados por não apresentarem significância, após a análise da matriz de variância-covariância.

A área objeto do estudo foi a Pedreira São Jorge, no município de Balsa Nova, Estado do Paraná. Na

época deste trabalho, maio de 2006, a pedreira apresentava um paredão vertical de aproximadamente 50m de altura, formando um círculo envolvendo todo o pátio de trabalho, excetuando-se o local de entrada para o mesmo. Os trabalhos de varredura a laser e a tomada de fotos deviam ser feitos no mesmo dia, dada a dinâmica de exploração da pedreira.

Para a finalidade deste trabalho desenvolveu-se um aplicativo, na linguagem de programação Delphi. Este aplicativo realiza o georreferenciamento da imagem tomada pela câmara digital, pois para o cálculo do ângulo de azimute e conseqüente ângulo de mergulho necessita-se da direção Norte.

2 Metodologia

Para se fazer a integração, dos dados provenientes da varredura laser com as imagens tomadas, quarenta e três pontos foram pré-sinalizados nas rochas, usando-se projéteis contendo líquido colorido (*paintball*). Na parte inferior do paredão, local de fácil acesso, empregaram-se mais oito alvos de sinalização (pintura fosforescente), totalizando cinquenta e um pontos pré-sinalizados.

O equipamento laser foi posicionado aproximadamente no centro do pátio da pedreira, e a varredura foi configurada com espaçamento aproximado, entre pontos, de 2cm a 3cm. Os pontos pré-sinalizados, devido ao líquido existente (*paintball*) ou pintura fosforescente, tornaram-se visíveis na imagem de intensidade do laser. Para se melhorar a integração dos dados, varredura laser com imagens tomadas pela câmara Sony, efetuou-se varreduras de alta resolução (2mm a 3 mm) dentro de pequena área retangular envolvendo cada ponto pré-sinalizado.

Para se georreferenciar as nuvens de pontos, adquiridas pelo equipamento laser, levantaram-se dois pontos pelo GPS, obtendo-se a informação mínima necessária para se transformar todos os pontos levantados na varredura. Desta forma as coordenadas de todos os pontos foram convertidas para o sistema de coordenadas WGS84.

Todos os pontos de apoio pré-sinalizados permitiram identificação na imagem de intensidade do laser, fornecendo meios de se efetuar a leitura das coordenadas dos mesmos.

Diversas imagens foram tomadas pela câmara digital. Para este trabalho uma imagem foi selecionada (Figura 1), fazendo-se nela a observação para a obtenção das coordenadas de pixel dos mesmos pontos pré-sinalizados. Estas leituras permitiram o equacionamento de um ajustamento dos parâmetros de orientação exterior da imagem selecionada, que são apresentados na Tabela 2. X_o , Y_o , Z_o são coordenadas do centro de perspectiva (mais precisamente do ponto nodal anterior) da câmara no instante da tomada da foto, em metros, e κ , φ e ω representam os ângulos referentes à atitude da câmara, em radianos.

Para se agregar as informações oriundas da imagem digital, e da varredura LASER, deve-se escolher um referencial comum, transformando todas as informações para o novo referencial. Neste trabalho optou-se pela seleção do referencial do espaço-imagem isento de distorções (projeção central). Neste caso a imagem representa uma projeção central perfeita da região abrangida pela tomada da foto.

A justificativa para a escolha deste referencial baseia-se em dois fatos: o primeiro é o de que as distâncias amostrais de terreno coberto pela imagem são menores (melhor resolução) que as distâncias médias encontradas no perfilamento LASER. Isto leva a uma escolha do espaço-imagem, em detrimento do espaço-objeto.

Tabela 2 - Parâmetros de Orientação Exterior (OE) de Imagem Selecionada

PARÂMETROS OE	IMAGEM SELECIONADA
X_o	42,6949092757
Y_o	4,6503286123
Z_o	-15,1757615316
κ	-0,1008595554
φ	-2,7660573464
ω	-3,3566776190



Figura 1: Imagem Seleccionada

O segundo fator, levado em consideração para a escolha do referencial comum, se baseia no interesse pelas feições retilíneas. A imagem distorcida, como o próprio nome diz, transforma os segmentos de reta em curvas, perdendo uma das principais características desejáveis para pesquisa na imagem.

O espaço-imagem, conforme visto em uma imagem digital, é composto por uma rede regular (matriz de pontos). Para se transformar a foto tomada para o espaço-imagem isento de distorções deve-se reamostrar a imagem adquirida, gerando uma nova imagem (saída do processo). Para se evitar pontos duplicados ou inexistentes, na nova rede regular de pontos obtida (espaço-imagem isento de distorções), aconselha-se que a transformação ocorra do espaço final de saída para o espaço de entrada, conforme técnicas consagradas de processamento de imagem, e em sentido inverso ao esperado.

Para a eliminação das distorções contidas na imagem, com reamostragem no espaço-imagem isento de distorções, deve-se, portanto, introduzir os erros sistemáticos a partir deste espaço. Ocorre aqui, então, a necessidade de método iterativo para a reamostragem (ver Machado et al., 2004; Machado, 2006). Neste trabalho empregou-se o método iterativo de Newton-Raphson para resolução de sistemas de equações (ver Scarborough, 1958).

Esta reamostragem pode ocorrer de inúmeras formas, mas basicamente, conservando-se as dimensões da imagem (quantidade de pixels), e/ou o tamanho dos pixels: optou-se, neste trabalho, por conservar as dimensões da imagem, e o tamanho de cada pixel. Desta forma, o aspecto do pixel foi preservado. A Figura 2 apresenta a imagem selecionada isenta de erros sistemáticos.



Figura 2: Imagem Seleccionada Isenta de Erros Sistemáticos

2.1 Monorrestituição Sem Iterações

Os algoritmos utilizados fizeram uso de uma altitude associada a cada pixel no espaço-imagem isento de distorções. Estas altitudes foram sempre distinguidas, ao longo de todo o processo, como sendo

interpoladas ou originais (provenientes da varredura LASER, via equações de colinearidade e parâmetros de orientação exterior).

As coordenadas finais de um trabalho cartográfico devem ser fornecidas no espaço-objeto, em coordenadas referenciadas a um sistema de projeção. Para se obter tais coordenadas, a partir de uma localização específica dentro de uma imagem, deve-se empregar as equações de colinearidade, em sua forma inversa. Estas equações necessitam da altitude Z, previamente à obtenção das coordenadas planimétricas. Sem se dispor da altitude, fica-se impossibilitado de se ter X e Y, coordenadas planimétricas. Por outro lado, tendo-se as mesmas, pode-se encontrar a altitude via DTM (Modelo Digital de Terreno).

Para resolver este impasse, Makarovic (1973) sugeriu o processo de monorrestituição, para superfícies contínuas, que consiste em adotar uma altitude inicial (geralmente uma altitude média da região trabalhada) e calcular, a partir daí, as coordenadas planimétricas. Encontradas as mesmas, obtém-se uma nova altitude, mais refinada, que pode ser usada novamente nas equações de colinearidade, em sua forma inversa. Este processo é repetido até que as diferenças entre as coordenadas novas e antigas sejam menores que uma tolerância prefixada.

O modelo digital de terreno corresponde a uma amostra do relevo do terreno. A rigor, onde não houver observação, não se pode dizer nada sobre o relevo naquela localização. É claro que, para que um DTM seja bem aceito, ele deve conter informações sobre os pontos mais notáveis do terreno, de forma que, mesmo com uma amostra, consiga-se interpolar adequadamente qualquer posição da região de estudo. Segue-se que a interpolação fornece uma informação "aproximada" sobre o terreno. Quanto melhor o DTM tanto melhor a aproximação.

Pode-se ainda discutir aqui o tipo de algoritmo de interpolação utilizado. A literatura apresenta diversos procedimentos (vizinho mais próximo, regressão polinomial, triangulação com interpolação linear, citando uns poucos). Dependendo da escolha que se fizer, pode-se obter resultados diferentes, melhores (mais perto da realidade do terreno) ou piores. A única importante qualidade que se pode atribuir à interpolação é que é aproximada.

A imagem tomada por uma câmara segue as características da projeção central, mantendo a colinearidade (eliminadas as distorções do processo). Sob uma linha reta, as proporções são mantidas. Como conclusão importante tem-se que a triangulação com interpolação linear (tipo de interpolação) apresenta os mesmos resultados quer seja executada no espaço-imagem ou no espaço-objeto. Mais, qualquer interpolação que se faça no espaço-imagem pode ser vista como mais um tipo de interpolação (uma nova função) apresentando um novo resultado, diferente ou não (como qualquer algoritmo de interpolação).

Com este embasamento propõe-se associar, a todo pixel do espaço-imagem, uma altitude original ou interpolada, procurando representar o relevo do terreno, como se fosse uma maquete (a escala de Z é real 1:1).

Resumindo-se, para se agregar as informações do espaço-objeto (coordenadas de pontos da varredura LASER) usa-se apenas as equações de colinearidade, em sua forma direta. Os parâmetros de orientação exterior já foram apresentados na Tabela 2. Consegue-se, desta forma, georreferenciar uma boa parte dos pixels contidos na imagem. Para a imagem trabalhada o georreferenciamento ficou na ordem de 17,65% dentre os pixels da imagem.

Para se transformar as coordenadas de imagem (de qualquer polígono vetorizado) para o espaço-objeto usa-se a altitude associada ao pixel do qual se deseja as coordenadas de terreno. Neste caso não se precisa realizar iterações para a obtenção das coordenadas finais. Já que a altitude é conhecida, as coordenadas planimétricas são determinadas diretamente pelas equações de colinearidade. As coordenadas das feições vetorizadas são, então, armazenadas apropriadamente em arquivos.

Um ponto que merece ser destacado aqui é o das superfícies contínuas. Torna-se claro que, em teoria, não se pode fazer uso do processo de monorrestituição para superfícies com descontinuidade (bordas de rochas), pois o algoritmo pode não convergir (a menos que se tome cuidados especiais). Já o processo de monorrestituição sem iterações não apresenta este problema, porque uma grade regular de pontos com altitudes associadas pode ser perfeitamente entendida como uma superfície contínua.

A Figura 3 ilustra, em tons avermelhados, os pontos de varredura LASER projetados sobre a imagem isenta de distorções. Observe-se os pontos de adensamento da malha de varredura. Para esta imagem projetou-se um total de 1410202 pontos de varredura LASER sobre uma superfície aproximada de 1053m².

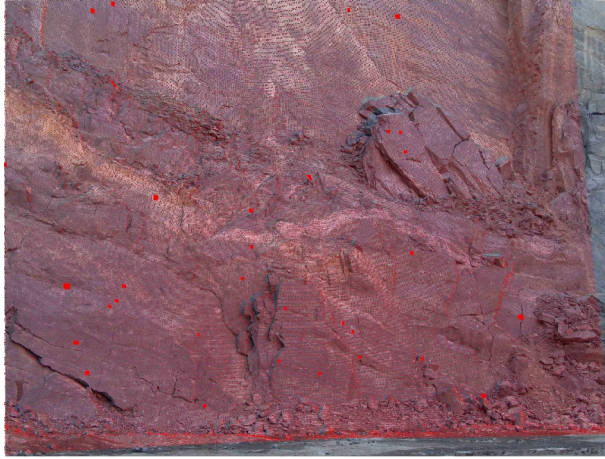


Figura 3: Pontos de Varredura LASER sobre Imagem Isenta de Distorções

2.2. Atitude Automática de Planos

Para se obter informações geológicas de atitudes de planos (medidas CLAR) automaticamente fez-se a triangulação bidimensional, por Delaunay (triângulos mais próximos ao equilátero), de todos os pontos de varredura LASER. No caso exemplo, o plano da imagem é o plano X-Z (paredão vertical de rochas), sendo Y a coordenada indicativa da distância ao observador.

A triangulação bidimensional por Delaunay foi realizada com o programa QDELAUNAY pertencente à biblioteca de programas QHULL de livre uso, disponível na Internet (<http://www.qhull.org/>). A partir de 1410202 pontos da varredura LASER obteve-se 268080 triângulos por Delaunay. Para cada triângulo determinou-se um plano, e para cada plano calculou-se o ângulo de azimute e mergulho. Torna-se claro que, dada a grande quantidade de triângulos gerados, as suas superfícies são bem pequenas (área média aproximada de 39cm²) podendo introduzir ruídos não interessantes ao processo de obtenção de informações geológicas.

A Figura 4 apresenta os ângulos de azimute obtidos nesta etapa. Observe-se que, para retratar a grande quantidade de observações, estas medidas foram normalizadas em função da maior dimensão disponível no gráfico, podendo ocultar a informação de maior relevância.

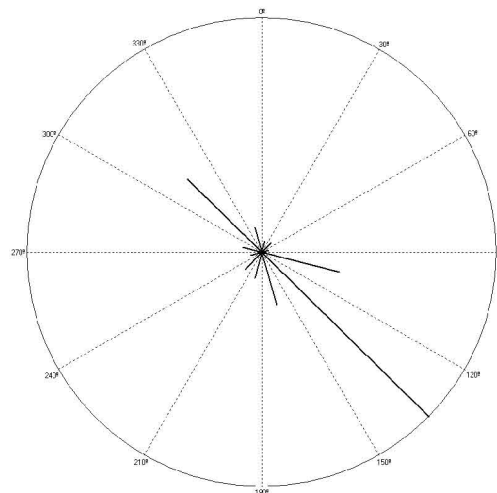


Figura 4: Ângulos de Azimute

2.3 Atitude Manual de Planos

O aplicativo desenvolvido apresenta a imagem georreferenciada. A cada três seleções de pontos (na imagem) pelo usuário, um plano é formado (três pontos definem um único plano), permitindo o cálculo da

atitude deste plano. A Figura 5 apresenta um plano determinado pelo usuário com a informação consequente de atitude do mesmo (Ângulos de Azimute/Mergulho = 123/74).



Figura 5: Ângulos de Azimute e Mergulho

3 Conclusões

Os testes realizados mostraram-se promissores. No experimento apresentado (pedreira vertical), muitas observações de atitudes são praticamente impossíveis de serem obtidas no local, não acarretando nenhuma dificuldade em laboratório com o emprego do aplicativo desenvolvido.

Para a continuidade deste trabalho pretende-se implementar a ferramenta de *zoom*, buscando melhor visualização de detalhes na imagem. Outro melhoramento que deve ser introduzido diz respeito à visualização tridimensional com anaglifos. O desenvolvimento destas melhorias deve propiciar melhor qualidade na obtenção de informações geológicas, representando um avanço no tratamento de informações geológicas.

4 Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar seu agradecimento à Petrobrás, através do projeto IMAGE, e a FUNPAR, Fundação da Universidade Federal do Paraná para o Desenvolvimento da Ciência, da Tecnologia e da Cultura, pelo apoio financeiro a este trabalho. Os equipamentos e o espaço de trabalho foram cedidos pelo Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná.

5 Referências Bibliográficas

ACKERMANN, F.: *Airborne Laser Scanning – Present Status and Future Expectations*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 54 (1), 1999. p. 64-67.

AXELSSON, P.: *Processing of Laser Scanner Data – Algorithms and Applications*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 54 (1), 1999. p. 138-147.

BALTSAVIAS, E. P.: *A Comparison between Photogrammetry and Laser Scanning*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. v. 54 (1), 1999. p. 83-94.

CSATHÓ, B.; SCHENK, T.; LEE, D.-C; FILIN, S.: *Inclusion of Multispectral Data into Object Recognition*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. v. 32 (7-4-3W6), 1999. p. 53-60.

FRITSCH, D.; KILIAN, J.: *Filtering and Calibration of Laser Scanner Measurements*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. v. 30 (3), 1994. p. 227-234.

FRITSCH, D.: *Virtual Cities and Landscape Models – What Has Photogrammetry to Offer?*. In: Fritsch, D., Spiller, R. (Eds.), *Photogrammetric Week '99*. Wichmann, Heidelberg, 1999. p. 3-14.

HAALA, N.: *Detection of Buildings by Fusion of Range and Image Data*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. v. 30 (3), 1994. p. 341-346.

HAALA, N.; ANDERS, K.-H.: *Acquisition of 3D Urban Models by Analysis of Aerial Images, Digital Surface*

Models and Existing 2D Building Information. In: McKeown Jr., D.M., McGlone, J.C., Jamet, O. (Eds.), *Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision III*. Proceedings SPIE, v. 3072, 1997. p. 212-222.

HAALA, N.: *Combining Multiple Data Sources for Urban Data Acquisition*. In: Fritsch, D., Spiller, R. (Eds.), *Photogrammetric Week '99*. Wichmann, Heidelberg, 1999. p. 329-339.

MACHADO, A. M. L.; MITSHITA, E. A; DELARA, R. S.: *Estudo de Caso: Correção de Erros Sistemáticos em Câmaras Digitais Não-Métricas*. Série em Ciências Geodésicas: Cartografia, Instrumento de Renovação Política e Inovação Tecnológica, Vol 4, 2004, p. 130-144.

MACHADO, A. M. L.: *Extração Automática de Contornos de Edificações Utilizando Imagem Gerada por Câmara Digital de Pequeno Formato e Dados LIDAR*, Curitiba, 2006. Tese (Doutor em Ciências Geodésicas) – UFPR, 201p.

MAKAROVIC, B.: *Digital Mono-Plotters*. I.T.C. Journal, v. 1, p. 101-122, 1973.

MARSHAK, S.; MITRA, G.: *Basic Methods of Structural Geology*. New Jersey, Prentice Hall, Inc., 1988, 446p.

PACIULLO, F. V. P.: *Atitude de Planos e Linhas*. Disponível em: <https://www.forum.geologia.ufrj.br/files/atitude_de_planos_e_linhas.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2006.

SCARBOROUGH, J. B.: *Numerical Mathematical Analysis*. 4. ed. Baltimore: The Johns Hopkins Press, 1958.

TOTH, C.; GREJNER-BRZEZINSKA, D.: *Improved DEM Extraction Techniques – Combining LIDAR Data with Direct Digital GPS/INS Orientated Imagery*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. v. 32 (2-5-3/W10), 6A-4, 1999. p. 1-7.

VOSELMAN, G.: *Building Reconstruction Using Planar Faces in Very High Density Height Data*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 32 (3-2W5), 1999. p. 87-92.