Pesquisas em Geociências

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

Ortorretificação de imagens CBERS 2 utilizando a transformação DLT

Paula Debiasi, Sérgio de Souza, Edson Mitishita
Pesquisas em Geociências, 38 (1): 55-65, jan./abr., 2011.

Versão online disponível em:
<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/23835>

Publicado por
Instituto de Geociências

Portal de Periódicos
UFRGS

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Informações Adicionais

Email: pesquisas@ufrgs.br

Políticas: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

Submissão: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

Diretrizes: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

Data de publicação - jan./abr., 2011.

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Ortorretificação de imagens CBERS 2 utilizando a transformação DLT

Paula DEBIASI^{1,3}, Sérgio F. de SOUZA² & Edson A. MITISHITA³

1. Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. BR 465 km 07. CEP: 23890-000, Seropédica, RJ, Brasil. E-mail: pauladebiasi@yahoo.com.br.

2. Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Avenida Bento Gonçalves, 9500. CEP: 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: sergio.florencio@ufrgs.br.

3. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. J. Américas. CEP: 81531-990, Curitiba, PR, Brasil. E-mail: mitishita@ufpr.br.

Recebido em 09/2008. Aceito para publicação em 04/2011.

Versão online publicada em 17/10/2011 (www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br)

Resumo - Este trabalho avalia a potencialidade da geração de ortoimagens advindas do sensor CCD do CBERS 2, produzidas através de um modelo matemático generalizado, a Transformação Linear Direta (DLT). Para a geração das ortoimagens, utilizou-se de duas fontes de informação altimétrica: um Modelo Digital de Elevação (MDE), gerado pela missão SRTM e outro MDE gerado por curvas de nível e pontos cotados de cartas topográficas na escala 1:50.000. Foi realizado o processo de ortorretificação de um recorte da cena CBERS, utilizando os diferentes MDE's. As ortoimagens foram analisadas e classificadas pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) com o uso de pontos de verificação. Para a avaliação da necessidade de ortorretificação da cena CCD CBERS 2, o mesmo recorte foi também corrigido geometricamente por um polinômio de 2º grau. Os resíduos planimétricos gerados pela simples correção através do polinômio de 2º grau demonstram que há necessidade do processo de ortorretificação, ou seja, correção de erros devido à topografia do relevo nesta cena. A comparação entre as ortoimagens geradas pelos diferentes MDE's demonstra que é satisfatória a utilização do MDE do SRTM na ortorretificação de imagens advindas do sensor CCD do CBERS2.

Palavras-chave: Ortorretificação, DLT, CBERS.

Abstract - ORTHORECTIFICATION OF CBERS 2 IMAGES USING THE DLT TRANSFORMATION. This work evaluates the orthoimages generation potentiality of the CCD sensor from the CBERS 2, by using a generalized mathematical model called "Direct Linear Transformation (DLT)". Two Digital Elevation Models (DEM's) sources of altimetry information data for the orthoimages generations were used: the first generated from SRTM mission and the other one developed from contour lines and topographic points counted in a 1:50.000 scale. An orthorectification process of a cutting out scene from the CBERS was performed with both DEM's. The images were analyzed and classified according to the *Padrão de Exatidão Cartográfica* (PEC) using check points. To evaluate the necessity of orthorectifications in the CCD CBERS 2 scene, the same cutting out was also object of geometric corrections having a second degree polynomial as a tool. The planimetrics residues generated by the second degree polynomial simplified corrections were just enough to demonstrate the necessity of the orthorectification process, that is, corrections of errors due to the embossment topography at the considered scene. The comparison of the images produced by the different DEM's demonstrates that the utilization of the DEM from the SRTM is a satisfactory tool for images orthorectifications of the CBERS 2.

Keywords: Orthorectification, DLT, CBERS.

1. Introdução

O programa de satélites Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS - *China-Brazil Earth Resources Satellite*) proporcionou ao Brasil o monitoramento de seu território através de imagens orbitais próprias. A política do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) de distribuição de imagens gratuitas pela internet aumentou a utilização do Sensoriamento Remoto no Brasil. O uso de

imagens orbitais requer, em algumas aplicações, um maior controle geométrico, sendo realizadas correções geométricas antes da extração de informações cartográficas. Consta-se a necessidade de avaliar a potencialidade da geração de ortoimagens utilizando imagens advindas do sensor CCD (*Charge Couple Device* - Dispositivo de Carga Acoplada) do CBERS 2, sendo as ortoimagens produtos cada vez mais aplicados como bases cartográficas em diversas áreas do conhecimento.

Para a ortorretificação de imagens orbitais existem modelos matemáticos rigorosos, baseados nas equações de colinearidade ou modelos generalizados. Para a utilização de modelos matemáticos rigorosos, deve-se obter os parâmetros de atitude, calibração e órbita do sensor, que nem sempre estão disponíveis. Os modelos matemáticos generalizados são independentes dos parâmetros do sensor e do tipo de plataforma (Elashmawy *et al.*, 2005). Estes modelos são vastamente aplicados em imagens em que não se dispõe dos parâmetros do sensor (Fernandes *et al.*, 2004; Okamoto *et al.*, 1998; Pedro, 2005).

Por ser uma tecnologia relativamente nova, as imagens do CBERS 2 não possuem modelos matemáticos específicos, nem estão disponibilizados os parâmetros para a aplicação de modelos rigorosos. Esta problemática limita a aplicação de suas imagens em trabalhos que necessitam um maior controle geométrico. O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar ortoimagens do sensor CCD do CBERS 2 geradas por um modelo matemático generalizado, a Transformação Linear Direta (DLT - *Direct Linear Transformation*).

A transformação DLT já foi vastamente utilizada para correção geométrica de imagens orbitais de alta resolução, como em imagens IKONOS, QUICKBIRD E SPOT (Abreu, 2005; Behdinian, 2002; Fernandes *et al.*, 2004; Hosseini & Amini, 2005 e Savopol & Armenakis, 1998). Neste trabalho, a transformação DLT é utilizada na ortorretificação de uma imagem de média resolução. Testou-se o uso do Modelo Digital de Elevação (MDE) do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) no processo, pois similarmente às imagens CCD-CBERS 2, o MDE do SRTM é disponibilizado gratuitamente. Buscou-se, assim, uma alternativa de baixo custo para a ortorretificação de imagens CCD do satélite CBERS 2.

2. Ortorretificação

O processo de ortorretificação utiliza uma imagem em perspectiva central para formar uma imagem retificada (imagem vertical corrigida de erros relativos à atitude do sensor durante a tomada da imagem) e corrigida dos deslocamentos devido ao relevo. Para a correção dos deslocamentos devido ao relevo é necessário um MDE da área em estudo. A transformação da imagem para a projeção ortogonal é obtida através de transformações

matemáticas. Para tanto, existem modelos matemáticos rigorosos, também designados de modelos físicos por descrever fisicamente a geometria do imageamento no instante de tomada da imagem. O desenvolvimento de modelos rigorosos requer informações como dados da trajetória do satélite e parâmetros de calibração do sensor, dados nem sempre disponíveis ao usuário. Os modelos de correção generalizados não descrevem fisicamente o processo de imageamento, mas utilizam uma transformação generalizada para relacionar as coordenadas de imagem e as coordenadas de terreno. O uso de modelos generalizados permite a correção de imagens sem o conhecimento dos parâmetros de orientação interior e exterior do sensor, como no caso das imagens do sensor CBERS 2. A relação do sistema imagem com o sistema objeto é obtida através do uso de pontos de controle.

3. Transformação DLT

A transformação DLT foi desenvolvida por Abdel-Aziz & Karara em 1971 para a calibração de câmaras não-métricas. Esta equação modela a transformação entre o sistema de coordenadas da imagem e o sistema de coordenadas do espaço objeto, sem a necessidade do conhecimento de parâmetros de orientação interior e exterior do sensor. A DLT é dada pelas seguintes equações:

$$x = \frac{L_1 \cdot X_p + L_2 \cdot Y_p + L_3 \cdot Z_p + L_4}{L_9 \cdot X_p + L_{10} \cdot Y_p + L_{11} \cdot Z_p + 1} \quad (1)$$

$$y = \frac{L_5 \cdot X_p + L_6 \cdot Y_p + L_7 \cdot Z_p + L_8}{L_9 \cdot X_p + L_{10} \cdot Y_p + L_{11} \cdot Z_p + 1} \quad (2)$$

Em (1) e (2) x e y são as coordenadas do ponto na imagem; X_p , Y_p e Z_p são as coordenadas do ponto no espaço objeto e L_1 a L_{11} são os parâmetros da transformação DLT, sendo:

$$L = \frac{1}{m_{31} \cdot X_c + m_{32} \cdot Y_c + m_{33} \cdot Z_c} \quad (3)$$

$$L_1 = L \cdot (x_0 \cdot m_{31} - C_x \cdot m_{11}) \quad (4)$$

$$L_2 = L \cdot (x_0 \cdot m_{32} - C_x \cdot m_{12}) \quad (5)$$

$$L_3 = L \cdot (x_0 \cdot m_{33} - C_x \cdot m_{13}) \quad (6)$$

$$L_4 = x_0 + [L \cdot C_x \cdot (m_{11} \cdot X_c + m_{12} \cdot Y_c + m_{13} \cdot Z_c)] \quad (7)$$

$$L_5 = L \cdot (y_0 \cdot m_{31} - C_y \cdot m_{21}) \quad (8) \quad c_y, x_o, y_o, x \text{ e } y \text{ estão em unidades do comparador, ou seja, no sistema de coordenadas da imagem, não sendo necessária a utilização das marcas fiduciais. Neste aspecto, a transformação DLT é de grande importância para a utilização em câmeras não métricas e imagens orbitais.}$$

$$L_6 = L \cdot (y_0 \cdot m_{32} - C_y \cdot m_{22}) \quad (9)$$

$$L_7 = L \cdot (y_0 \cdot m_{33} - C_y \cdot m_{23}) \quad (10)$$

$$L_8 = y_0 + [L \cdot c_y \cdot (m_{21} \cdot X_c + m_{22} \cdot Y_c + m_{23} \cdot Z_c)] \quad (11)$$

$$L_9 = L \cdot m_{31} \quad (12)$$

$$L_{10} = L \cdot m_{32} \quad (13)$$

$$L_{11} = L \cdot m_{33} \quad (14)$$

Onde x_o e y_o são coordenadas do ponto principal; X_c , Y_c e Z_c são as coordenadas do centro de perspectiva no espaço objeto e $(m_{11}, \dots, m_{33})$ são elementos da matriz de rotação. Para derivar-se a DLT da equação de colinearidade adota-se uma escala diferente para as direções x e y da distância principal (c_x, c_y) (Mikhail *et al.*, 2001). Nestas equações c_x ,

4. Programa Registro

O programa Registro, utilizado neste trabalho, foi desenvolvido em linguagem Delphi 4.0 por alunos da pós-graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Neste programa, é possível realizar a ortorretificação de imagens orbitais através de diferentes modelos matemáticos, como a transformação Afim no Plano, a transformação DLT e o Modelo APM (*Affine Projection Model*). A figura 1 descreve o fluxograma das etapas de ortorretificação de imagens no programa Registro.

Figura 1. Fluxograma de processamento do Programa Registro.

O processo de ortorretificação no programa Registro inicia-se com a escolha do modelo matemático que será utilizado. Nesta fase preliminar, também se seleciona o método de reamostragem e a resolução espacial da imagem a ser ortorretificada. Após esta etapa, são fornecidos ao programa dois arquivos, um contendo os pontos de controle a serem usados no ajustamento e outro com pontos a serem usados para a verificação da qualidade do processo. O ajustamento do modelo matemático é realizado e são calculados o RMS (*Root Mean Square*) e os parâmetros da transformação escolhida. Após o ajustamento, pode-se inserir a imagem a ser ortorretificada e o MDE a ser utilizado, possibilitando, com isso, o processo de ortorretificação. Na figura 01, verifica-se a existência de um módulo a parte do programa para a adaptação dos dados do SRTM, possibilitando a transformação do sistema de referência e projeção, bem como o recorte do MDE segundo a área da imagem a ser ortorretificada.

5. Experimentos, resultados e análises

O processo de ortorretificação de imagens corrige a imagem de distorções inerentes à elevação do relevo, projetando a imagem em uma perspectiva ortogonal. As distorções devido à elevação do relevo são diretamente relacionadas com a magnitude destas elevações. A análise da significância das distorções referentes às elevações do terreno baseia-se no cálculo do deslocamento máximo devido ao relevo, representado na figura 2.

Figura 2. Deslocamento máximo devido ao relevo. Fonte: Adaptada de Correia et al. (2005).

Por semelhança de triângulos, encontra-se a seguinte relação:

$$\Delta H = \left(\frac{H}{D} \right) \Delta x \quad (15)$$

Sendo ΔH o deslocamento máximo devido ao relevo, Δx o erro planimétrico máximo admissível, que para este trabalho será referenciado ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) para cartas classe A na escala 1:50.000, resultando em 25 m. Os dados restantes estão relacionados às imagens CCD do CBERS 2, sendo H a altitude do satélite (778 km), D a metade da faixa de imageamento (56,5 km) e α a metade do ângulo do campo de visada ($4,15^\circ$). O deslocamento máximo devido ao relevo, calculado para a imagem CCD do CBERS2 no PEC da classe A da escala 1:50.000, é de 344 m. Ou seja, se a região de estudo apresentar diferença de nível máxima, relativa entre dois de quaisquer de seus pontos inferior a 344 m, poderá ser considerada plana, pois o deslocamento devido ao relevo é inferior ao erro planimétrico máximo admissível, que é de 25 m no PEC classe A da escala 1:50.000. A região sendo considerada plana, não existe a necessidade de ortorretificar a imagem, pois não haverá deslocamentos significativos devido aos efeitos do relevo.

A escolha da área teste deste trabalho deveu-se principalmente às características do relevo. A região concentra-se na Mesorregião do Centro Oriental Paranaense e possui relevo variando de plano a acidentado, abrangendo em sua área o Cânion do Guartelá (Fig. 3). A variação de altitude é de até 700 metros e, portanto, como demonstrado anteriormente, é uma área propícia para testes de ortorretificação de imagens CCD do CBERS 2.

Foram disponibilizadas para este trabalho quatro cartas topográficas do ano de 2001, confeccionadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em convênio com a Companhia Paranaense de Energia (COPEL). As cartas estão na escala 1:50.000 classe A, com curvas de nível de equidistância de 20 m, no Sistema Geodésico SAD-69 e projeção UTM. A qualidade das cartas topográficas em formato digital, bem como a atualidade de suas informações, possibilitou uma correspondência entre as feições visualizadas na imagem e nas cartas topográficas. Também foi disponibilizado um mosaico de ortofotos produzido pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC - com resolução espacial de 25 cm. Este mosaico de ortofotos foi produzido utilizando fotografias de

uma câmara de baixo custo integrada a um sistema LIDAR (*Light Detection and Ranging*) de um levantamento aéreo realizado no ano de 2008.

A imagem CCD do CBERS 2 da região teste foi adquirida gratuitamente no site do INPE, no Sistema Geodésico SAD-69. O critério utilizado para a seleção da cena foi a ausência de nuvens na região de interesse, bem como a atualidade da imagem, que foi obtida em setembro de 2006. A imagem possui nível 2 de correção, ou seja, é uma imagem com correção radiométrica e geométrica. A área de abrangência das cartas topográficas delimitou o recorte da imagem CCD CBERS 2, recobrindo o quadrante inferior direito da cena.

Utilizando o recorte da imagem e as cartas topográficas como referência, foram coletadas as coordenadas de imagem, com as respectivas coordenadas de terreno, de 50 pontos. O critério de escolha destes pontos foi a localização de feições artificiais (cruzamento de estradas e pontes) que

fossem facilmente identificáveis nas cartas topográficas e no recorte da imagem, e que estivessem homogeneamente distribuídos no recorte. Os pontos foram divididos em pontos de controle (que participam do ajustamento do modelo matemático de correção geométrica) e pontos de verificação (pontos que não participam do ajustamento e servem para a checagem da qualidade da correção geométrica). Selecionaram-se os 19 pontos que possuíam melhor qualidade, ou seja, pontos em que as feições estavam melhor relacionadas na imagem e na carta e que possuísssem uma distribuição uniforme na imagem, para servir como verificação. O restante dos pontos serviu como controle. Utilizando o mosaico de ortofotos, foram coletadas as coordenadas de terreno de 9 pontos, para também servirem como verificação. A figura 4 ilustra a distribuição dos pontos de controle e de verificação no recorte da imagem.

Figura 3. Mapa de localização da área teste.

Figura 4. Ilustração da localização dos pontos de controle e de verificação.

Observa-se, na figura 4, que a área de abrangência dos pontos de verificação coletados no mosaico de ortofotos (símbolo quadrado) é muito menor que a área de estudo total. A região do mosaico de ortofotos restringe-se somente à área do Cânion do Guartelá. Estes pontos são importantes na verificação deste trabalho pois esta é a região que possui o relevo mais acidentado da área de estudo.

Para testar o processo de ortorretificação de imagens CCD CBERS 2, utilizando a transformação DLT, foram usadas duas fontes de informação altimétrica: uma advinda das cartas topográficas e outra da missão SRTM. O MDE derivado das informações altimétricas (curvas de nível e pontos cotados) contidas nas cartas topográficas foi interpolado pelo método de Krigagem, com grade regular de 20 m, compatível com a resolução espacial da imagem CCD CBERS 2.

O arquivo do MDE do SRTM, em coordenadas geográficas no sistema WGS-84, foi adquirido no formato ASCII no site do CGIAR-CSI (*Consultative Group on International Agricultural Research- Consortium for Spatial Information*). O arquivo disponibilizado pelo CGIAR-CSI abrange uma região de 5° x 5°, sendo que as áreas com vazios de informações altimétricas geradas pelo SRTM foram interpoladas com os valores vizinhos. O cabeçalho do arquivo é formado por informações como número de linhas e colunas do arquivo, coordenada do canto inferior esquerdo e tamanho da célula da grade, que é 0.00083 radianos, aproximadamente 90 m. A seguir, o arquivo contém os valores de Z disponibilizados por linhas, iniciando no canto superior esquerdo da área. Utilizou-se desta fonte, e não do original gerado pela NASA, devido à facilidade de leitura deste formato pelo programa Registro e pelo pré-tratamento de dados espúrios.

O MDE do SRTM foi pré-processado no programa Registro através das adaptações realizadas especificamente para este tipo de MDE. Inicialmente, foi realizada a sua leitura, a transformação do seu cabeçalho para coordenadas UTM referidas ao SAD-69, a separação do arquivo nos diferentes fusos UTM e a delimitação da área de interesse, conforme o fluxograma da figura 01. O MDE produzido com as cartas topográficas e o MDE do SRTM foram interpolados pelo mesmo método (Krigagem) e com grades regulares de mesmo tamanho (20 m), sendo ambos referenciados ao mesmo sistema de referência. A escolha do método de interpolação deveu-se a este ser uma técnica geoestatís-

tica vastamente utilizada no tratamento de dados do SRTM (Valeriano, 2002; Grohmann & Steiner, 2008; Iwashita & Souza Filho, 2009). Devido a estas particularidades, foi possível a comparação entre os produtos. Com a subtração do MDE do SRTM pelo MDE das Cartas pode-se inferir sobre as diferenças existentes entre os modelos. A figura 5 representa a magnitude das diferenças altimétricas entre o MDE do SRTM e o MDE das cartas:

Figura 5. Subtração: MDE Cartas - MDE SRTM.

Através desta comparação, verificou-se que nas áreas de relevo acidentado, por exemplo, no cânion do Guartelá (canto inferior direito) o MDE produzido pelas cartas topográficas possui valores de altitude aproximadamente 60m acima do MDE do SRTM. A precisão do MDE adotado para a ortorretificação de uma imagem está diretamente relacionada com a precisão do produto gerado. Se a precisão do MDE é de boa qualidade, sendo este compatível com a realidade do terreno, o processo de interpolação de pontos altimétricos será mais preciso, proporcionando uma melhor precisão no cálculo da planimetria da ortoimagem.

O ajuste da transformação DLT no programa Registro foi realizado com o uso dos pontos de controle. Obtendo-se os valores dos 11 parâmetros de transformação da DLT, o RMS total do ajustamento e os erros individuais para cada ponto. De posse dos resíduos individuais dos pontos, foram determinados os pontos com erros grosseiros (erro superior a 1 pixel) e estes foram realocados na imagem ou na carta, ou mesmo retirados do ajustamento,

até que o valor do RMS total fosse próximo a 1 pixel. Realizado este procedimento, chegou-se ao valor de RMS total para o ajustamento dos pontos de controle através da transformação DLT de 0,689 pixel e os resíduos individuais, conforme a figura 6.

Analisando a figura 6, verifica-se que os resíduos dos pontos de controle são, em sua maioria, menores que um pixel e possuem uma distribuição aleatória em X e Y, demonstrando que a média final dos resíduos é próxima de zero. A análise completa do ajustamento da DLT foi realizada com os 19 pontos que não participaram do ajustamento, os pontos de verificação coletados nas cartas topográficas. Primeiramente, detectou-se a existência de erros grosseiros nos pontos de verificação, ajustando a transformação DLT com estes e analisando o RMS total e individual no ajustamento. Não sendo detectados maiores problemas, estes pontos serviram para a verificação do ajustamento da DLT com os pontos de controle, gerando um RMS de 0,908. Realizada esta etapa, foram obtidos os 11 parâmetros da transformação DLT conforme a tabela 1:

Figura 6. Resíduos em X e Y dos pontos de controle no ajustamento da transformação DLT.

Após o ajuste da transformação DLT com os pontos de controle e da verificação do ajustamento com os pontos restantes, foram geradas duas ortoimagens no programa Registro, cada uma utilizando um dos diferentes MDE's descritos anteriormente. Conforme abordado no item 2, a necessidade de ortorretificação de uma imagem deve-se a distorções inerentes à elevação do relevo. Imagens de regiões planas não necessitam da correção devido ao relevo e podem ser apenas retificadas utilizando, por exemplo, modelos polinomiais para a correção geométrica da imagem. O relevo da área

teste foi considerado não plano pelo cálculo anterior, sendo necessária a correção da imagem devido às distorções do relevo. Porém, com a finalidade de comparar os resultados, corrigiu-se o recorte da cena CCD-CBERS 2 também com um polinômio de 2º grau, utilizando os mesmos pontos de controle que na transformação DLT.

Devido à inexistência de normas brasileiras para a avaliação de produtos cartográficos digitais, utilizou-se como método de avaliação e classificação das ortoimagens e da imagem corrigida através do polinômio de 2º grau o PEC determinado pelo decreto 89.817 (CONCAR, 2007). Conforme este decreto, 90% dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC planimétrico estabelecido. Porém, como para este trabalho não foram realizados levantamentos de pontos no terreno, os pontos utilizados como "verdadeiros" foram os 19 melhores pontos selecionados nas cartas (círculos da figura 04). As coordenadas dos 19 pontos de verificação foram determinadas nas duas ortoimagens e na imagem corrigida pelo polinômio de 2º grau e comparadas com suas respectivas coordenadas retiradas das cartas topográficas, gerando valores de discrepância planimétrica. Para a avaliação das correções geométricas realizadas, foram produzidas as figuras 7, 8 e 9.

Tabela 1. Os 11 Parâmetros de Transformação DLT.

Parâmetros da Transformação DLT	
L_1	0,0454913705
L_2	0,0000248581
L_3	-0,0010949386
L_4	-24080,6471445529
L_5	0,0001370656
L_6	-0,0457839795
L_7	-0,0000783238
L_8	335066,4407364550
L_9	-0,0000000133
L_{10}	-0,0000000107
L_{11}	-0,0000003387

Figura 7. Verificação gráfica das discrepâncias planimétricas obtidas nos pontos de verificação na ortoimagem gerada a partir do MDE das Cartas.

Figura 8. Verificação gráfica das discrepâncias planimétricas obtidas nos pontos de verificação na ortoimagem gerada a partir do MDE do SRTM.

Figura 9. Verificação gráfica das discrepâncias planimétricas obtidas nos pontos de verificação na imagem corrigida pelo polinômio de 2º grau.

Os círculos nas figuras 7, 8 e 9 definem o limite da discrepância planimétrica para a escala 1:50.000 da classe A do PEC, e os quadrados definem as discrepâncias planimétricas dos 19 pontos de verificação. Verifica-se na figura 7 que nenhum dos pontos de verificação possui discrepância planimétrica acima do limite de 25 m. Na figura 8 verifica-se que apenas 2 pontos de verificação (10,5% do total) possuem discrepância planimétrica acima do limite de 25 m. A análise das figuras 7 e 8 demonstra que é possível classificar as duas Ortoimagens no PEC classe A para a escala 1:50.000, pois 90% dos pontos de verificação possuem discrepância planimétrica inferior a 25m. Este resultado demonstra que a utilização do MDE advindo do SRTM na ortorretificação de imagens CCD do CBERS 2 produz resultados similares à ortorretificação destas através de um MDE mais detalhado como o advindo de curvas de nível de cartas topográficas na escala 1:50.000. Este resultado satisfaz a hipótese de que através de um MDE disponibilizado gratuitamente na internet pode-se ortorretificar imagens CCD do CBERS 2 com facilidade e obter-se resultados similares a uma ortorretificação com informações altimétricas nem sempre disponíveis para o usuário de imagens de Sensoriamento Remoto ou em alguns casos inexistentes.

A figura 9 apresenta as discrepâncias planimétricas geradas com a correção da imagem por um polinômio de 2º grau. Verifica-se que 11 pontos de verificação (57,9% do total) possuem discrepância planimétrica superior à magnitude de 25m. Com esta análise pode-se concluir que esta correção geométrica não poderia ser classificada na escala 1:50.000 classe A do PEC. Porém pela figura 10 constata-se que é possível classificar estes dados na escala 1:50.000 classe B do PEC.

Na figura 4 foram apresentados dois conjuntos de pontos de verificação, o primeiro conjunto de pontos foi coletado das cartas topográficas, e o segundo conjunto de pontos refere-se a 9 pontos com coordenadas de terreno coletadas em um mosaico de ortofotos com resolução espacial de 25cm. Como verificado na figura 4 este conjunto de pontos não abrange toda a área de estudo, porém restringe-se a área com relevo mais acidentado da região. Estes pontos também foram utilizados para a verificar a qualidade das ortoimagens e da imagem corrigida pelo polinômio de 2º grau. A tabela 2 apresenta as discrepâncias planimétricas destes pontos de verificação na ortoimagem gerada com o MDE das cartas, na ortoimagem gerada com o MDE

do SRTM e na imagem corrigida pelo polinômio de 2º grau:

Figura 10. Verificação gráfica das discrepâncias planimétricas obtidas nos pontos de verificação na imagem corrigida pelo polinômio de 2º grau segundo o PEC escala 1:50.000 classe B.

O resíduo deste conjunto de pontos de verificação pode ser verificado na figura 11, em que os

círculos definem o limite da discrepância planimétrica para a escala 1:100.000 da classe B do PEC, e os quadrados definem as discrepâncias planimétricas dos 9 pontos de verificação na ortoimagem gerada com o MDE das cartas, na ortoimagem gerada com o MDE do SRTM e na imagem corrigida pelo polinômio de 2º grau.

Através da avaliação utilizando os pontos de verificação retirados do mosaico de ortofotos, conclui-se que na região do cânion as imagens possuem maior distorção geométrica. Além disto, nota-se a existência de efeitos sistemáticos nas discrepâncias planimétricas dos pontos em ambas as imagens. Este fato pode ser devido a existência de somente 1 ponto de controle nesta região (Fig. 4).

Os resultados adquiridos na ortorretificação da imagem através da DLT foram considerados satisfatórios e deve-se principalmente à atualidade das cartas topográficas e do mosaico de ortofotos utilizados como referência, o que possibilitou a correta localização de feições na imagem para servirem como pontos de controle e de verificação.

Tabela 2. Diferença planimétrica entre as coordenadas dos pontos de verificação retirados do mosaico de ortofotos com as Ortoimagens e a Imagem Corrigida pelo Polinômio de 2º grau.

Ponto	Orto Carta – Mos. (m)			Orto SRTM – Mos. (m)			Pol. 2º grau – Mos. (m)		
	ΔE	ΔN	Dis. Plan	ΔE	ΔN	Dis. Plan	ΔE	ΔN	Dis. Plan
1	16,28	-4,11	16,79	40,49	-12,57	42,40	38,02	52,17	64,55
2	4,71	72,76	72,91	8,54	64,32	64,88	46,33	68,83	82,97
3	57,88	24,14	62,71	61,82	15,68	63,78	79,53	40,40	89,20
4	42,49	23,44	48,53	26,64	35,00	43,99	84,21	59,48	103,10
5	37,56	11,25	39,21	21,33	22,80	31,22	59,16	27,38	65,19
6	25,86	36,61	44,82	29,99	68,15	74,46	47,57	73,02	87,15
7	-9,67	51,97	52,86	-25,68	43,51	50,52	12,00	68,17	69,22
8	28,68	50,82	58,35	52,95	62,38	81,82	70,44	46,95	84,65
9	41,60	17,54	45,15	25,65	29,09	38,78	63,29	13,69	64,75
Média	27,27	31,60	49,04	26,86	36,48	54,65	55,62	50,01	78,98
Desvio	20,85	23,75	15,92	25,56	26,41	17,32	22,48	20,13	13,68

Figura 11. Verificação gráfica das discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação obtidos do mosaico de ortofotos.

6. Conclusões

Constatou-se que o modelo matemático DLT é aplicável para a ortorretificação de imagens de média resolução como a CCD CBERS 2 em áreas de relevo acidentado. As imagens particionadas não podem ser ortorretificadas por processos convencionais existentes na maioria dos softwares comerciais; sendo que a utilização da DLT é uma maneira de contornar esse problema. Este aspecto é de grande importância tratando-se de imagens que abrangem extensas áreas como as imagens CCD do CBERS 2, possibilitando assim a delimitação de áreas de estudo e a redução no levantamento de pontos de controle. A utilização do MDE do SRTM demonstrou-se satisfatória para a ortorretificação de imagens CCD CBERS 2 na escala 1:50.000 ou menores.

A utilização de polinômios de 2º grau para a correção de cenas CCD CBERS de áreas de relevo acidentado não absorve os erros inerentes à elevação do relevo, produzindo neste trabalho discrepâncias planimétricas em sua maioria superiores a um pixel da imagem, sendo necessário o processo de ortorretificação. Uma considerável vantagem na utilização da transformação DLT para a correção geométrica de imagens é que, diferentemente do uso de polinômios, a DLT modela os parâmetros de distorção relativos à aquisição da imagem e utilizando-se sensores de quadro estes parâmetros podem ser recuperados.

Os resultados adquiridos com a metodologia proposta na área teste deste trabalho impulsiona a aplicação da mesma metodologia em outras áreas de estudo, para testar o seu comportamento em regiões de diferentes características de relevo e

distribuição de pontos, para a comprovação dos resultados alcançados. Recomenda-se a utilização de diferentes fontes de informação cartográfica, sendo interessante neste caso, à utilização da metodologia em área de relevo escarpado e com pontos de controle e verificação levantados *in loco*. O levantamento de pontos através do GPS (*Global Positioning System*) garantiria a localização exata do ponto na imagem bem como a precisão de suas coordenadas.

O trabalho também proporcionou o surgimento de perspectivas para a futura aplicação desta metodologia na ortorretificação de cenas do satélite CBERS 2B que foi lançado no dia 19 de setembro de 2007 e possui uma câmera pancromática de resolução espacial de 2,7 m. Segundo Savopol & Armenakis (1998) novos sensores tornam-se operacionais e seus modelos matemáticos específicos podem não estar disponíveis imediatamente. Por esta razão, o mesmo autor afirma que o uso do modelo da DLT é necessário durante as investigações das potencialidades do novo sensor.

Agradecimentos - Este trabalho é parte integrante da dissertação de mestrado de Paula Debiasi defendida no CEPARM da UFRGS. Os autores agradecem a Álvaro M. L. Machado da UFPR pelo tempo disponibilizado na implementação e nas adaptações do programa Registro e ao LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - pela disponibilização do mosaico de ortofotos.

Referências

Abdel-Aziz, Y.I. & Karara, H.M. 1971. Direct linear transformation from comparator coordinates into

- object space coordinates in close-range photogrammetry. *In: AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY SYMPOSIUM ON CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY*, 1971, Urbana. p. 1-18.
- Abreu, F.C.S. & Antunes, A.F.B. 2005. Comparação da monorestituição de imagem QUICKBIRD II com restituição convencional de aerofotos 1:8000. *In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS*, 2005. Curitiba. *Anais ...* Curitiba, CBCG, 2005.
- Behdinian, B. 2002. Generating Orthoimage from Ikonos Data. *In: ASIAN CONFERENCE ON REMOTE SENSING*, 23. Kathmandu, Nepal 2002.
- CGIAR - CSI. *Consultative Group for International Agriculture Research - Consortium for Spatial Information* Disponível em: <http://srtm.csi.cgiar.org/> Acesso em junho de 2007.
- CONCAR. Comissão Nacional de Cartografia: Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional, *Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984*. Disponível em: www.concar.ibge.gov.br Acesso em agosto de 2007.
- Correia, J.D., Cruz, C.B.M., Menezes, P.M.L., Marini, S.S. & Barros, R.R. 2005. Contribuição das imagens CBERS na Atualização do Mapeamento Sistemático Brasileiro na escala 1:100.000. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, Goiânia, 2005, *Anais...*, Goiania, SBSR. p. 873-880.
- Elashmawy, N., Elmanadilli, Y. & Barakat H. 2005. Comparative analysis and evaluation of various mathematical models for stereo IKONOS satellite images. *In: FIG WORKING MEEK 2005 AND INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE GLOBAL SPACIAL DATA INFRASTRUCTURE*, 8, *Proceedings...*, Cairo, Egito, 2005.
- Fernandes, V.O., Mitishita, E.A., Bähr, H.P. & Vögtle, T. 2004. Análise do potencial da Monorestituição digital aplicado à imagem multispectral Daedalus ATM e aerofoto métrica integrado ao laser scanning. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO*, 6, *Anais...*, Florianópolis, 2004.
- Grohmann, C.H.; Steiner S.S. 2008. SRTM resample with short distance-low nugget kriging. *International Journal of Geographical Information Science*, 22, p. 895-906.
- Hosseini, M. & Amini, J. 2005. Comparison Between 2-D and 3-D Transformations for Geometric Correction of IKONOS images. *In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY & REMOTE SENSING*, Hannover, 2005.
- Iwashita, F. & Souza Filho, C.R. 2009. Avaliação da interpolação de dados SRTM-90 m através de dados SRTM-30 m do território americano. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 14, Natal, *Anais...* SBSR, 2009. p 3927-3934.
- INPE. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* Disponível em <http://www.cbers.inpe.br/> Acesso em outubro de 2006 e junho de 2007.
- Mikhail, E.M., Bethel, J.S. & McGlone, J.C. 2000. *Introduction to Modern Photogrammetry*. John Wiley & Sons, Inc. New York; 496p.
- NASA. *National Aeronautics and Space Administration* Disponível em <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> Acesso em setembro de 2006 e fevereiro de 2007.
- Okamoto, A., Fraser, C., Hattoti, S., Hasegawa H. & Ono, T. 1998. An alternative approach to the triangulation of SPOT imagery. *In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY & REMOTE SENSING*, 32(4), Stuttgart, p. 457-462, 1998.
- Pedro, P.C. 2005. *Avaliação de Ortoimagens utilizando o modelo APM (Affine Projection Model) e imagens de alta resolução Ikonos e Quickbird*. 91p. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.
- Savopol, F. & Armenakis, C. 1998. Modelling of the IRS-1C satellite pan stereo-imagery using the DLT approach. *In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY & REMOTE SENSING*, 32(4), Stuttgart, p. 511-514.
- Valeriano, M.M. 2002. *Modelos digitais de elevação de microbacias elaborados com krigagem*. São José dos Campos, INPE, 56p.