

Revista Brasileira de Cartografia (2012) N° 64/5: 540-550
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

ORIENTAÇÃO DE IMAGENS HRC-CBERS 2B UTILIZANDO OS MODELOS DLT E APM

Orientation of HRC-CBERS 2B Images Using DLT and APM Models

Tiago Lima Rodrigues & Felipe Martins Marques da Silva

Universidade Federal do Paraná – UFPR
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Caixa Postal 515 – 12201-970 – Curitiba – PR, Brasil
engtlirodrigues@yahoo.com.br; felipemarques21@hotmail.com;

Recebido em 05 de maio, 2011/ Aceito em 26 de novembro, 2011
Received on may 05, 2011/ Accepted on november 26, 2011

RESUMO

As imagens do sensor HRC do satélite CBERS 2B são fornecidas gratuitamente e possuem resolução espacial de 2,5 m, constituindo boa fonte de dados para extração de informações geodésicas e para o mapeamento terrestre. Contudo, para que seja possível a realização de tais atividades, a imagem deve estar orientada em relação ao referencial do espaço objeto, o que é realizado através de modelos matemáticos, atualmente divididos em rigorosos e generalizados. A abordagem rigorosa requer dados de orientação interior e exterior ao sensor. Tais informações nem sempre estão disponíveis aos usuários, ou quando estão não apresentam acurácia adequada. Outra questão é que esta abordagem não é aplicável a recorte de imagens ou em imagens reamostradas. Estes problemas podem ser contornados com a utilização de modelos generalizados, como o RFM, APM e DLT. Diante disso, este trabalho visa avaliar uma metodologia para orientação de imagens HRC-CBERS 2B mediante o uso dos modelos DLT e APM. Resultados mostraram que a acurácia horizontal obtida foi sub-pixel, e desta forma compatível com a escala 1:25000, classe A, segundo o PEC brasileiro.

Palavras chaves: Orientação de Imagens, HRC, DLT, APM.

ABSTRACT

The images of HRC-CBERS 2B sensor are available for free and present spatial resolution of 2,5m, becoming a good source of extracting geodetic information and terrestrial mapping. However, to perform these activities, the image must be related to a ground coordinate reference system that can be carried out through mathematical models, which are usually classified into rigorous models and generalized models. The rigorous approach requires information related to both interior orientation and exterior orientation of the sensor. This information is not usually available or if so, it does not present a good enough accuracy. Besides this approach is not applicable to clipped or resampled images. Those difficulties can be overcome using generalized models such as the RFM, APM and DLT. Therefore, that paper aims to evaluate a methodology of orientation to HRC-CBERS 2B images using two mathematic models: DLT and APM. The results showed that the horizontal accuracy was sub-pixel, compatible to 1:25000 scale, class A, according to Cartographic Accuracy Standard (PEC).

Keywords: Image orientation, HRC, DLT, APM

1. INTRODUÇÃO

O programa denominado CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite*) é o resultado de uma parceria entre os governos brasileiro e chinês com o objetivo de promover o lançamento de uma série de satélites de observação da Terra, os quais vieram a se tornar uma das mais poderosas ferramentas para aquisição de dados de sensoriamento remoto para o imenso território brasileiro. Segundo informações do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), durante todo o tempo de disponibilidade de imagens obtidas com os satélites da família CBERS, a expressividade da importância da missão é comprovada pelos mais de 15.000 usuários, de mais de 1.500 instituições, cadastrados como usuários ativos, e também nas mais de 700.000 imagens distribuídas.

O programa já contou com o lançamento de três plataformas orbitais: CBERS-1, CBERS-2 e o CBERS-2B. Particularmente, O CBERS 2B gerou aproximadamente 74.000 imagens com a câmera CCD, 11.000 com a WFI e 300.000 com a HRC, apenas sobre a América do Sul. Segundo dados do INPE, foram distribuídas gratuitamente cerca de 270.000 imagens deste satélite a usuários brasileiros e outras 60.000 a usuários de mais de 40 países.

Durante algum tempo o Brasil contou com duas plataformas operantes, no entanto no início de 2009 a missão CBERS-2 foi dada como terminada. Em maio de 2010, a plataforma CBERS-2B se tornou também inoperante. Porém, mesmo após estes fatos as imagens continuam sendo amplamente utilizadas.

As imagens CBERS apresentam grande potencial de utilização para construção e/ou para a atualização de documentos cartográficos, tendo em vista a disponibilização gratuita dos dados. Entretanto, para a utilização destas, é fundamental que haja um controle geométrico da imagem, isto é, que a imagem esteja referenciada a um sistema de coordenadas geodésicas ou cartográficas. Para tal, torna-se necessário realizar a orientação das imagens antes de sua utilização.

Neste contexto estão inseridas as diversas metodologias para orientação indireta de imagens visando extrair informações métricas confiáveis das feições presentes nas mesmas.

Nos últimos 20 anos diversas pesquisas relacionadas ao desenvolvimento e à aplicação de modelos matemáticos de orientação para sensores

pushbroom lineares têm sido realizadas. Neste contexto, duas classes foram indicadas, a saber: modelos rigorosos ou físicos e modelos generalizados baseando-se em transformações polinomiais (TOUTIN, 2004).

Os modelos rigorosos são baseados na utilização das equações de colinearidade modificadas e nos parâmetros físicos do sensor. Entretanto, os dados de orientação interior (distância focal, tamanho do pixel no CCD, tamanho físico do CCD) e exterior (posição e orientação do centro perspectivo para cada linha da imagem) da plataforma nem sempre estão disponíveis, ou quando estão, não apresentam acurácia suficiente para a sua aplicação, o que se torna um problema para o uso de tais modelos. Outra questão que impossibilita a utilização de tais modelos é a restrição do mesmo para imagens reamostradas (já referenciada a algum Sistema de coordenadas, como o UTM, mas sem acurácia adequada) e/ou recortadas na direção perpendicular ao deslocamento do satélite. A reamostragem altera os valores iniciais dos pixels, e o recorte impossibilita relacionar o tamanho da imagem ao tamanho do CCD. Assim, tais operações alteram as condições físicas de obtenção da imagem, impedindo a utilização dos parâmetros físicos da imagem, obtidos quando a mesma foi formada.

Uma forma de contornar tal situação e simplificar o processo é utilizar modelos generalizados que independem destes parâmetros físicos. Assim, tais modelos permitem orientar imagens recortadas e/ou reamostradas. Imagens nestas condições são freqüentemente utilizadas pela maioria dos usuários de imagens CBERS. Isto devido ao fato de que as imagens fornecidas diretamente pelo INPE já são reamostradas, ou seja, pré-referenciada ao Sistema UTM, com orientação de baixa qualidade realizada a partir de dados de efemérides (imagens com processamento nível 2) (Machado e Silva, 2007), e ao fato de que pode ser efetuado um recorte na imagem, para considerar apenas uma área de interesse específico do usuário.

Segundo Toutin (2004), alguns dos modelos generalizados mais utilizados são *Rational Function Model* (RFM), *Affine Projection Model* (APM) e *Direct Linear Transformation* (DLT). Autores como Cruz et. al. (2005) e Rodrigues et. al. (2009) utilizaram funções racionais em seus trabalhos referentes a orientação de imagens CCD CBERS-

2, e imagens HRC-CBERS-2B, respectivamente. Já Debiassi et. al. (2007) e Dal Poz e Scalco (2007) utilizaram o modelo DLT na orientação de imagens CCD CBERS-2.

Considerando aplicações com o modelo APM foram realizados em imagens de alta resolução como Ikonos, QuickBird e Spot, têm-se alguns trabalhos relevantes como Yamakawa e Fraser (2004), Ono et. al. (2000) e Pedro (2005).

Ao analisar este contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a acurácia da orientação de imagens do sensor HRC do CBERS 2B a partir dos modelos generalizados DLT e APM para duas regiões de estudo, investigando a possibilidade de utilização destes modelos nas imagens disponibilizadas pelo INPE, seja qual for o nível de processamento, e independente de haver recortes. Em seguida tem-se o objetivo específico de verificar qual escala, de acordo com o PEC, estariam inseridos documentos cartográficos extraídos das imagens HRC-CBERS orientadas por estes modelos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sensor HRC

O sensor HRC era uma das cargas úteis do satélite CBERS 2B e operava numa única faixa espectral, cobrindo o visível desde a faixa do verde até o infravermelho próximo (0,5 até 0,8 μm). Este sensor produziu imagens pancromáticas de uma faixa de 27 km por 27 km com uma resolução de 2,5 m. A Tabela 1 apresenta algumas das principais características do sensor HRC.

2.2 Modelo matemático DLT

Este modelo é baseado em uma razão polinomial, relacionando as coordenadas do espaço

Tabela 1. Características do sensor HRC do satélite CBERS 2B.

Tipo	Tipo TDI CCD
Banda espectral	0,50 - 0,80 μm
Campo de visada	2,1°
Resolução espacial	2,5 m x 2,5 m
Largura da faixa	27 Km (Nadir)
Resolução temporal	130 dias
Taxa de dados da imagem	432 Mbits/s (antes da compressão)
Quantização	8 bits
Altitude da órbita	778 km

imagem e do espaço objeto, independente dos parâmetros físicos de orientação interior e exterior.

Segundo Mitishita *et al* (2003) este modelo é um caso particular do modelo RFM e, de acordo com Mikhail *et al* (2001), a concepção deste modelo é obtida a partir da Equação da Colinearidade, porém utilizando fatores de escala diferentes para as componentes x e y da distância focal.

As equações do modelo DLT são demonstradas a seguir:

$$x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (1)$$

$$y = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}$$

Nas equações, (x,y) são coordenadas, em milímetros, no CCD, obtidas a partir da leitura de coluna e linha; (X,Y,Z) são as coordenadas, em metros, no referencial geodésico ou cartográfico do terreno; e L_i a L_{11} são os parâmetros da transformação DLT.

2.3 Modelo matemático APM

De acordo com Lugnani (1987) o modelo matemático APM, também conhecido como Equação de Projeção Paralela, é um caso particular da projeção central onde o centro de projeção é deslocado para o infinito.

Uma vez que o sensor HRC-CBERS 2B é do tipo *pushbroom* linear, cada linha apresentará um conjunto de parâmetros de orientação exterior diferentes, variantes no tempo. Deste modo, as variações podem ser obtidas por polinômios de 1° ou 2° graus dependentes do tempo (Orun; Natarajan, 1994, Bang; Cho, 2001). As equações de colinearidade modificadas para sensores *pushbroom* linear são (Gugan, 1987):

$$0 = x_s = -f \frac{r_{11}(X_i - X_s) + r_{12}(Y_i - Y_s) + r_{13}(Z_i - Z_s)}{r_{31}(X_i - X_s) + r_{32}(Y_i - Y_s) + r_{33}(Z_i - Z_s)} \quad (2)$$

$$y_s = -f \frac{r_{21}(X_i - X_s) + r_{22}(Y_i - Y_s) + r_{23}(Z_i - Z_s)}{r_{31}(X_i - X_s) + r_{32}(Y_i - Y_s) + r_{33}(Z_i - Z_s)} \quad (3)$$

sendo X_i, Y_i e Z_i as coordenadas do espaço objeto; X_s, Y_s e Z_s as coordenadas do centro perspectivo do sensor no Sistema de coordenadas cartesianas terrestre; x_s, y_s são as coordenadas do Sistema de referência do sensor, sendo a direção y_s

perpendicular ao deslocamento do satélite na órbita; f é a distância focal calibrada do sensor e; r_{11} , ..., r_{33} são os componentes da matriz de rotação.

A matriz de rotação é construída a partir dos ângulos de atitude da plataforma, ω , φ e κ , e tem o objetivo de alinhar o sistema de coordenadas do espaço imagem com o sistema de coordenadas do espaço objeto. A equação 26 a seguir apresenta a matriz de rotação e os seus componentes em função dos ângulos de Euler.

$$R = R_z(\kappa)R_y(\varphi)R_x(\omega) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Assumindo que a cena é obtida em uma projeção paralela, pode-se considerar a distância focal f infinita. Deste modo, a equação 2 e 3 torna-se:

$$0 = r_{11}(X_i - X_0) + r_{12}(Y_i - Y_0) + r_{13}(Z_i - Z_0) \quad (5)$$

$$y = r_{21}(X_i - X_0) + r_{22}(Y_i - Y_0) + r_{23}(Z_i - Z_0) \quad (6)$$

Uma vez que a formação da cena HRC é de aproximadamente 4 segundos, pode-se considerar que o movimento da plataforma ocorre linearmente e que os ângulos de atitude da plataforma sejam invariáveis. Desta forma, tem-se que a posição da plataforma em cada linha é dada por:

$$\begin{aligned} X_0 &= X_0 + \Delta X \cdot i \\ Y_0 &= Y_0 + \Delta Y \cdot i \\ Z_0 &= Z_0 + \Delta Z \cdot i \end{aligned} \quad (8)$$

com X_0 , Y_0 e Z_0 sendo a posição na primeira linha da cena, ΔX , ΔY , ΔZ a taxa de variação da posição em relação à linha i . Com a linha i substituindo a coordenada x na equação 2 tem-se:

$$i = \frac{r_{11}(X_i - X_0) + r_{12}(Y_i - Y_0) + r_{13}(Z_i - Z_0)}{r_{31}(X_i - X_0) + r_{32}(Y_i - Y_0) + r_{33}(Z_i - Z_0)} \quad (9)$$

Considerando os valores de r_{11} a r_{33} , X_0 , Y_0 , Z_0 , ΔX , ΔY , ΔZ constantes, substituindo as equações 8 na equação 9, manipulando algebricamente e agrupando os termos constantes, chega-se ao modelo APM:

$$\begin{aligned} x &= a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4 \\ y &= a_5X + a_6Y + a_7Z + a_8 \end{aligned} \quad (10)$$

onde os coeficientes de a_1 até a_8 são parâmetros de orientação independentes, não sendo variantes no tempo.

Fraser *et al* (2001), o modelo APM pode ser utilizado para imagens de alta resolução, uma vez que o sensor de linha CCD possui grande distância focal e um estreito campo de visada. Isso faz com que a imagem apresente projeção central no sentido de varredura do satélite e aproximação de uma projeção paralela no sentido do deslocamento do satélite.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram escolhidas duas áreas de estudo que possuíam dados de controle de campo (bases cartográficas) disponíveis gratuitamente: parte da cidade de Brasília no Distrito Federal, denominada área de estudo 1, e parte da cidade de Ponta Grossa no Estado do Paraná, denominada área de estudo 2.

3.1. Materiais

Os materiais utilizados, relativos à área de estudo são descritos a seguir:

a) Ponta Grossa – PR:

- Base cartográfica em formato digital disponibilizada pelo GeoPortal do referido município, com as seguintes características:

- Escala 1:2000;

- Datum Vertical: Imbituba-SC;

- Datum Horizontal: SAD-69;

- Projeção Universal Transversa de Mercator – UTM, fuso 22, Sul.

Recorte de uma imagem HRC-CBERS 2B órbita/ponto 157_C/128_3 de 29/08/2009, disponibilizada gratuitamente no sítio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE na internet, com as seguintes características:

- Nível de processamento 2;

- Sistema de Referência horizontal: WGS-84;

- Projeção Universal Transversa de Mercator – UTM, fuso 22, Sul.

b) Brasília – DF:

- Base Cartográfica em formato digital disponibilizada na internet a partir do sítio do SICAD, com as seguintes características:

- Escala 1:2000;

- Datum Vertical: Imbituba-SC;

- Datum Horizontal: Astro Chuá (MG);

- Projeção Universal Transversa de Mercator
- UTM, Zona 23, Sul.
- Recorte de uma imagem HRC-CBERS 2B órbita/ponto 157_B/118_1 de 05/06/2008, disponibilizada gratuitamente no sítio do INPE na internet, com as seguintes características:

- Nível de processamento 1;
- Sistema de Referência horizontal: WGS-84;

O aplicativo utilizado para a orientação das imagens para os dois modelos considerados nesta pesquisa foi o software REGISTRO, desenvolvido no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

3.2. Metodologia

De posse das imagens e bases cartográficas das duas áreas de estudo, realizou-se a escolha dos pontos de controle (GCPs – *Ground Control Points*) e dos pontos de verificação (CPs – *Check Points*) em cada uma das imagens.

Os pontos de controle foram coletados buscando distribuí-los por toda a imagem de modo mais uniforme possível, procurando não dispor muito pontos em uma região em detrimento de outra. Isto possibilita o melhor ajuste dos modelos matemáticos às mesmas, uma vez que o irá proporcionar resultados mais acurados por toda a imagem. Do mesmo modo foram coletados os pontos de verificação, pontos que, aplicados no modelo matemático com os parâmetros estimados, irão atestar a acurácia da orientação. Para a área de estudo 1 foram coletados 14 pontos de controle e 7 pontos de verificação e, para a área de estudo 2 foram coletados 15 pontos de controle e 8 pontos de verificação. A distribuição destes pontos sobre cada imagem pode ser vista nas Figuras 1 e 2 a seguir, referentes às áreas de estudo 1 e 2 respectivamente.

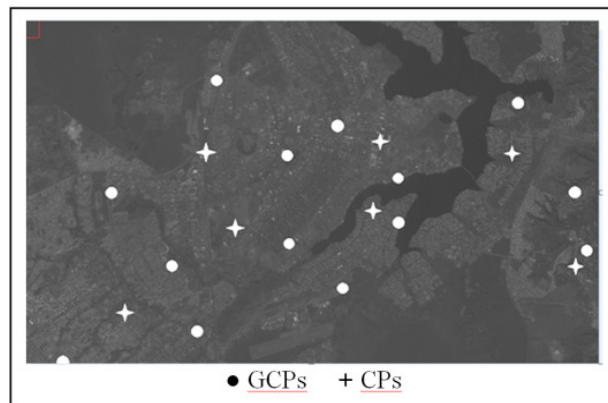


Fig. 1 - Distribuição dos GCPs e CPs na imagem referente à Brasília-DF. Fonte: O autor (2011).

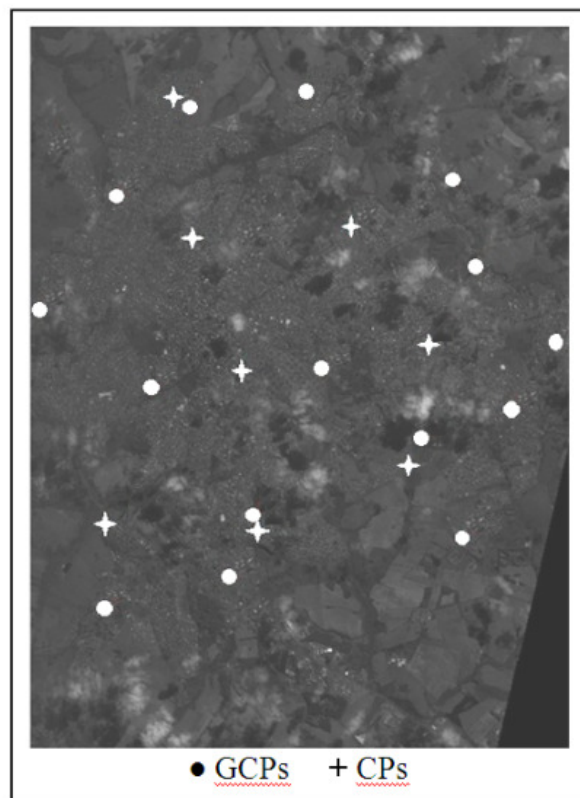


Fig. 2 - Distribuição dos GCPs e CPs na imagem referente à Ponta Grossa – PR. Fonte: O autor (2011).

Analisando o número de incógnitas em cada modelo e o número de pontos de controle pode-se obter o grau de liberdade para cada área. No caso da área de estudo 1, o grau de liberdade para o modelo DLT foi de 17 e para o modelo APM foi de 20. Já na área de estudo 2 o grau de liberdade para o modelo DLT foi de 19 e para o APM foi de 22.

Os conjuntos de pontos selecionados foram aplicados nos modelos matemáticos DLT e APM disponíveis no aplicativo REGISTRO. Este aplicativo foi desenvolvido em ambiente Delphi, no Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná – UFPR. Neste aplicativo, depois de selecionado o modelo matemático funcional, se houver graus de liberdade, realiza o ajustamento paramétrico de observações pelo método dos mínimos quadrados. No caso do modelo APM a solução é linear, não requerendo linearização da função e dados aproximados para o ajustamento. Já o modelo DLT apresenta solução não linear, necessitando ser linearizado; neste caso utilizando o método de Taylor (GEMAEL, 1994). Uma vez que nesta linearização os termos maiores ou iguais a 2 não são incluídos, fazem-se necessárias aproximações iniciais para os parâmetros, de forma

que haja iterações até que seja obtida a convergência. A qualidade dos parâmetros determinados no ajustamento pode ser verificada a partir da análise da matriz variância-covariância (MVC) dos parâmetros (GEMAEL, 1994).

Após a obtenção dos parâmetros de transformação, faz-se uso dos pontos de verificação com a finalidade de avaliar a qualidade da orientação da imagem. Assim, foram inseridos as coordenadas deste pontos nos modelos com os parâmetros estimados, determinando os valores de x e y , e conseqüentemente linha e coluna. Como se conhecem os valores de coluna e linha das posições verdadeiras dos pontos de verificação na imagem, comparam-se estes valores com os valores de coluna e linha calculados pelo modelo matemático. As diferenças entre tais valores (deslocamentos) em pixel são posteriormente convertidos para metros.

Para a avaliação estatística calculou-se a média, o desvio padrão e o EMQ (erro médio quadrático) de cada deslocamento. O desvio padrão com a finalidade de analisar a discrepância dos dados e o EMQ para indicar a acurácia ou exatidão dos dados obtidos.

Feita a orientação, considerando a hipótese de geração de uma imagem corrigida (ortorretificada), analisou-se o valor de tolerância planimétrica calculado conforme a classe A do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), juntamente com a análise da Freqüência de Nyquist, que considera que qualquer objeto só é distinguível a partir de dois pixels. Deste modo, parte-se da escala 1:25000 para os testes. Para a classe A nesta escala, o erro máximo aceitável é de 7,5 m.

Tais testes foram realizados conforme a metodologia apresentada por Galo e Camargo (1994), a qual apresenta duas análises: análise de precisão e análise de tendência. A análise de precisão é realizada a partir do Teste do Qui-quadrado teste estatístico que compara variâncias que determina se a amostra é representativa (adere à curva da distribuição normal), garantindo a precisão dos pontos calculados. A análise de tendência é realizada a partir do teste “t” de Student - teste estatístico para comparação de médias amostrais – que determina se as diferenças entre as coordenadas dos pontos coletados e calculados pelo modelo matemático inverso apresentam tendências sistemáticas (componente sistemática dos erros).

A análise da precisão pôde ser feita comparando-se o desvio-padrão das discrepâncias com o erro padrão (EP) esperado para o limite de exatidão no qual se deseja testar. Portanto o teste de hipótese a ser formulado é o seguinte:

$$H_0: S_{\Delta E}^2 = \sigma_{\Delta E}^2$$

$$S_{\Delta N}^2 = \sigma_{\Delta N}^2$$

contra

$$H_1: S_{\Delta E}^2 \neq \sigma_{\Delta E}^2$$

$$S_{\Delta N}^2 \neq \sigma_{\Delta N}^2$$

Os termos $S_{\Delta E}$ e $S_{\Delta N}$ correspondem ao desvio-padrão calculado para as componentes E e N. O erro padrão fixado para determinado trabalho pode ser calculado através da Equação abaixo:

$$\sigma = EP / 2 \quad (11)$$

Onde EP é o erro padrão aceitável para o trabalho. No caso desta análise considerou-se o EP como 1,5 pixels ou 3,75 m, considerando o valor da resolução espacial da imagem analisada.

Para que a hipótese H_0 contra H_1 fosse testada, foi calculado o Qui-quadrado (χ^2) amostral e logo após comparou-se este com o valor teórico obtido através da distribuição de probabilidade do Qui-quadrado. Este teste pode ser obtido utilizando-se as seguintes equações:

$$\chi_{\Delta E}^2 = \frac{S_{\Delta E}^2}{\sigma^2} \cdot (n - 1) \quad (12)$$

$$\chi_{\Delta N}^2 = \frac{S_{\Delta N}^2}{\sigma^2} \cdot (n - 1)$$

onde n é o número de amostras.

Logo após é verificado se o valor calculado está no intervalo de aceitação, ou seja:

$$\chi_{\Delta E}^2 \leq \chi_{1-\alpha}^2 \quad n-1 \quad (13)$$

e

$$\chi_{\Delta N}^2 \leq \chi_{1-\alpha}^2 \quad n-1 \quad (14)$$

Se a relação acima for verdadeira, a análise atende a precisão estipulada para determinado trabalho.

Na análise de tendências verifica-se se o valor de t amostral está no intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula, ou seja:

$$H_0: \mu = 0 \quad \text{contra} \quad H_1: \mu \neq 0$$

O valor de t amostral deve ser calculado através da seguinte Equação:

$$t = \frac{(\mu - \mu_0) \sqrt{n}}{S_\mu} \quad (15)$$

onde:

μ = Média;

μ_0 = Média esperada;

S_μ = Desvio padrão.

4. RESULTADOS

4.1. Resultados para a área de estudo 1

Estes resultados referem-se à aplicação do modelo DLT e APM na orientação da imagem da área de estudo 1 referente à parte da cidade de Brasília-DF, sendo denominados experimentos 1 e 2 respectivamente.

Após o ajustamento das observações, a partir dos pontos de controle selecionados no espaço objeto em ambos os modelos, foi possível determinar os parâmetros de orientação da imagem e suas respectivas precisões a partir das MVCs. Os parâmetros determinados para o experimento 1 e 2 e suas respectivas precisões são indicados na Tabela 2 e 3 respectivamente a seguir.

Posteriormente à determinação dos parâmetros e aplicação dos mesmos com os pontos de verificação no modelo, fez-se a avaliação estatística. Compararam-se diretamente os resultados do modelo com os pontos de verificação.

Tabela 2 - parâmetros obtidos no experimento 1.

	Parâmetros	Precisão
L ₁	-1,487893636	2,67
L ₂	3,1250799039956400 x 10 ⁻¹	5,61 x 10 ⁻¹
L ₃	1,4694582542579100 x 10 ⁻¹	3,00 x 10 ⁻¹
L ₄	-2318241,903	4,17 x 10 ⁶
L ₅	3,1894080836134 x 10 ⁻¹	5,72 x 10 ⁻¹
L ₆	1,491990624	2,68
L ₇	-1,1473588203325 x 10 ⁻¹	2,64 x 10 ⁻¹
L ₈	-1,2380896638895 x 10 ⁷	2,22 x 10 ⁷
L ₉	3,0816623284345400 x 10 ⁻⁷	5,748 x 10 ⁻⁷
L ₁₀	5,5619646714836000 x 10 ⁻⁷	7,798 x 10 ⁻⁷
L ₁₁	2,6375242609034700 x 10 ⁻⁵	4,986 x 10 ⁻⁵

Tabela 3 - parâmetros obtidos no experimento 2.

	Parâmetros	Precisão
a ₁	4,2564694154096200x 10 ⁻¹	1,68x 10 ⁻⁴
a ₂	-9,0220278708282600x 10 ⁻²	2,51x 10 ⁻⁴
a ₃	-8,8787449438143500x 10 ⁻⁴	2,36x 10 ⁻²
a ₄	6,6989872026661800x 10 ⁺⁵	2,05x 10 ⁺³
a ₅	-9,0719157800897x 10 ⁻²	1,68x 10 ⁻⁴
a ₆	-4,2672640573679x 10 ⁻¹	2,51x 10 ⁻⁴
a ₇	7,2861621018440x 10 ⁻²	2,36x 10 ⁻²
a ₈	3,5409354550301x 10 ⁺⁶	2,05x 10 ⁺³

A Tabela 4 apresenta o valor da média, desvio padrão e EMQ para as componentes E e N e resultante R nos experimentos 1 e 2.

Ao analisar os valores da Tabela 4 percebe-se que a exatidão da orientação da imagem a partir do modelo DLT na componente E é de 1,09 metros o que na imagem HRC corresponde a 0,43 pixels, na componente N é de 1,99 metros ou 0,79 pixels e, na resultante é de 1,89 m metros ou 0,75 pixels. Para o modelo APM a exatidão na componente E é de 2,02 ou 0,8 pixels, na componente N é de 2,75 ou 1,1 pixels e, na resultante é de 3,41 m metros ou 1,36 pixels. Os valores resultantes de exatidão calculados ficaram em torno de um pixel, sendo considerado satisfatório para fins cartográficos obtidos a partir de imagens (YAMAKAWA E FRASER, 2004; TOUTIN, 2004).

Tabela 4 - análise estatística dos resultados das orientações nos experimentos 1 e 2.

	Experimento 1			Experimento 2		
	E	N	R	E	N	R
Média (m)	0,1	0,21	1,53	0,27	0,28	3,06
DesvPad(m)	1,1	2,13	0,95	2,16	2,97	1,51
EMQ (m)	1,09	1,99	1,89	2,02	2,75	3,41

Posteriormente foi aplicado o teste do Qui-quadrado com a finalidade de analisar a precisão e o teste de t student para a análise de tendência nos dois experimentos. Na análise de precisão foi considerado intervalo de confiança de 90%, e desvio esperado de 2,5 m que corresponde à resolução espacial da imagem HRC. O Qui-quadrado amostral obtido na tabela de acordo com o grau de liberdade e o intervalo de confiança foi de 10,65. Para a análise de tendência foi considerado um intervalo de confiança de 95% e a

média esperada (μ_0) = 0 m. O *t student* amostral obtido na tabela, a partir do grau de liberdade e do intervalo de confiança foi de 1,44. A Tabela 5 a seguir apresenta os resultados destas análises.

Ao analisar os resultados da Tabela 5 observa-se que os resultados passaram no teste de precisão do Qui-quadrado, para 90% dos pontos utilizados, e, no teste de tendência do *t student* para o intervalo de confiança de 95%. O resultado do teste do *t student* indica houve a supressão da componente sistemática dos erros.

Tabela 5 - testes de precisão e tendência para os resultados estatísticos da área de estudo 1.

	Experimento 1		Experimento 2	
	E	N	E	N
Qui-quadrado amostral	0,2602	0,9676	0,9947	1,8831
<i>t student</i> amostral	0,2399	0,2555	0,1232	0,0952

4.2. Resultados para a área de estudo 2

Estes resultados referem-se à aplicação do modelo DLT e APM na orientação da imagem da área de estudo 2, referente à parte da cidade de Ponta Grossa-PR, sendo denominados experimentos 3 e 4 respectivamente.

De igual forma aos experimentos anteriores, posteriormente à realização do ajustamento das observações em ambos os modelos, a partir dos pontos de controle selecionados no espaço objeto, determinou-se os parâmetros de orientação da imagem. As Tabelas 6 e 7 a seguir apresentam os parâmetros determinados para os modelos DLT e APM respectivamente e as suas precisões.

Com base na comparação dos pontos de verificação com o resultado da aplicação dos parâmetros obtidos nos modelos, foi realizada a

Tabela 6 - parâmetros obtidos pelo modelo dlt para a área de estudo 2.

	Parâmetros	Variâncias
a ₁	4,0158838691297700x 10 ⁻¹	1,57 x 10 ⁻⁴
a ₂	-2,0429611903971500 x 10 ⁻³	1,84 x 10 ⁻⁴
a ₃	-2,2935644972008600 x 10 ⁻²	2,15 x 10 ⁻²
a ₄	-2,1858335499047500 x 10 ⁵	1,31 x 10 ³
a ₅	-8,6621345592005 x 10 ⁻³	1,57 x 10 ⁻⁴
a ₆	-3,9856070100952 x 10 ⁻¹	1,84 x 10 ⁻⁴
a ₇	-2,7793481586969 x 10 ⁻⁴	2,15 x 10 ⁻²
a ₈	2,8870063553434 x 10 ⁶	1,31 x 10 ³

Tabela 7 - parâmetros obtidos pelo modelo apm para a área de estudo 2.

	Parâmetros	Variâncias
a ₁	4,0158838691297700x 10 ⁻¹	1,57 x 10 ⁻⁴
a ₂	-2,0429611903971500 x 10 ⁻³	1,84 x 10 ⁻⁴
a ₃	-2,2935644972008600 x 10 ⁻²	2,15 x 10 ⁻²
a ₄	-2,1858335499047500 x 10 ⁵	1,31 x 10 ³
a ₅	-8,6621345592005 x 10 ⁻³	1,57 x 10 ⁻⁴
a ₆	-3,9856070100952 x 10 ⁻¹	1,84 x 10 ⁻⁴
a ₇	-2,7793481586969 x 10 ⁻⁴	2,15 x 10 ⁻²
a ₈	2,8870063553434 x 10 ⁶	1,31 x 10 ³

avaliação estatística. A Tabela 8 a seguir apresenta o valor da média, desvio padrão e EMQ para as componentes E e N e resultante na área de estudo 2.

No caso da área de estudo 2, a exatidão da orientação refletida na imagem a partir do modelo DLT na componente E é de 1,03 metros ou 0,41 pixels, na componente N é de 1,43 metros ou 0,57 pixels e, na resultante é de 1,77 m metros ou 0,70 pixels. Para o modelo APM a exatidão em E é de 1,61 ou 0,64 pixels, na componente N é de 1,38 ou 0,55 pixels e, na resultante é de 2,13 m metros ou 0,85 pixels. Tais valores resultantes são considerados satisfatórios para fins cartográficos obtidos a partir de imagens.

Tabela 8 - análise estatística da orientação pelos modelos dlt e apm para a área de estudo 2.

	Experimento 3			Experimento 4		
	E	N	R	E	N	R
Média (m)	0,08	0,13	0,15	0,2	0,11	0,22
Desvio-Padrão (m)	0,84	1,37	1,61	1,52	1,07	1,86
EMQ (m)	1,03	1,43	1,77	1,61	1,38	2,13

Na aplicação do teste do Qui-quadrado e do *t student* foram considerados os mesmos parâmetros dos experimentos 1 e 2, porém como o número de amostras foi alterado (pontos de verificação) os valores teóricos das distribuições também foram alterados. Portanto, têm-se os valores teóricos 12,02 e 1,41 para o Qui-quadrado e o *t student* respectivamente. A Tabela 9 a seguir apresenta os resultados destas análises.

Ao analisar-se a Tabela 9, nota-se que os resultados para a área de estudo 2 passaram no teste do Qui-quadrado, para 90% dos pontos

utilizados, bem como no teste *t student* para o intervalo de confiança de 95%. Também para ambos os modelos na área de estudo 2 a componente sistemática dos erros foi suprimida, o que indica que os modelos matemáticos foram adequados à orientação das imagens.

Tabela 9 - testes de precisão e tendência para os resultados estatísticos da área de estudo 2.

	Experimento 3		Experimento 4	
	E	N	E	N
Qui-quadrado amostral	0,1766	0,4671	0,5742	0,2828
<i>t student</i> amostral	0,2589	0,2597	0,1291	0,102

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os processos de orientação através dos modelos DLT e APM se mostraram como sendo metodologias alternativas, eficientes e altamente utilizáveis quando não se dispõe de dados de orientação interior e exterior necessárias para a utilização de modelos rigorosos, ou imagens com nível de processamento não compatível para utilização destes (e.g. imagens CBERS, nível 2). Outro ponto importante é que estas metodologias podem ser aplicadas a recortes de imagens, diferentemente dos modelos rigorosos, o que oferece ao usuário uma redução de tempo na execução dos trabalhos, pois permite uma restrição à área de seu interesse.

Para as imagens analisadas, os dois modelos suprimiram com sucesso a componente sistemática dos erros, restando apenas a componente aleatória, o que demonstra a eficácia da aplicação destes métodos em imagens HRC, desde que se tenha uma distribuição favorável dos pontos de controle sobre a área de estudo. Com relação à acurácia posicional, em ambos os modelos foram obtidos resultados menores que 1 pixel, com exceção do modelo APM aplicado na área de estudo 1 apresentando 1,3 pixels.

No caso de uma possível geração de ortoimagens nos 4 experimentos, observando a Frequência de Nyquist, verifica-se que há potencialidade de construção e/ou atualização de documentos cartográficos, segundo o PEC brasileiro, na classe A, na escala de 1:25000. Para tanto é necessário que se utilize um Modelo Digital de Terreno adequado, com altitude geométrica

referenciada ao mesmo elipsóide de referência e resolução espacial próxima.

Comparando com os resultados dos trabalhos de revisão bibliográfica citados, verificou-se que tanto o modelo APM quanto o modelo DLT atingiram resultados semelhantes aos obtidos por Debiassi (2007) e Dal Poz (2006), com acurácia em torno de 1 pixel.

Os resultados obtidos neste trabalho foram melhores que os apresentados por Rodrigues et. al. (2009) e Cruz (2005), que utilizaram o modelo RFM. Pedro (2005), com modelo APM utilizado em imagens QuickBird e Ikonos, também obteve resultados semelhantes aos aqui apresentados, com acurácia em torno de 1 pixel.

Desta forma entende-se que ambos os modelos, APM e DLT, são passíveis de utilização nas imagens HRC-CBERS-2B, apresentando-se como modelos mais simples e flexíveis à realidade dos usuários por serem utilizáveis em imagens recortadas e/ou reamostradas (imagens disponibilizadas pelo INPE).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradem ao professor Dr. Álvaro Muriel pela disponibilidade e auxílio na utilização do aplicativo REGISTRO.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANG, K. I.; CHO, W. Analysis of EOC Sensor Model. In: FIG WORKING WEEK, 2001, Seoul, Korea. **New Technology for a New Century**, Seoul, p. 57-65, 2001.
- CRUZ, C. B.; BARROS, R. S.; REIS, R. B. Ortorretificação de imagens CBERS2 usando DEM do SRTM – Área de aplicação: Angra dos Reis – RJ. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XII, 2005, Goiânia. **Anais...**, Goiânia, 2005. p. 899–906.
- DAL POZ, A. P., SCALCO, J. C. Orientação semi-automática de imagens CBERS usando rodovias como controle de campo. **Boletim em Ciências Geodésicas**, v. 12, n. 2, p. 295 – 313, 2006.
- DEBIASSI, P. D.; SOUZA, S. F., MITISHITA, E. A. Ortorretificação de imagens CBERS através da transformação DLT. In: Congresso Brasileiro de Geoprocessamento, XXIII, 2007, Rio de Janeiro. **Anais...**, Rio de Janeiro, 2007.

- FRASER, C. S.; HANLEY, H. B.; YAMAKAWA, T. **Sub-metre geopositioning with Ikonos Geo imagery**. Joint ISPRS Workshop “High Resolution Mapping From Space 2001”. Hannover, Germany, 79 - 21 September 2001.
- GALO, M.; CAMARGO, P. O. Utilização do GPS no controle da qualidade de carta. **Anais do 1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário**. Florianópolis, p. 41 - 48, 1994.
- GEMAEL, C. **Ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: UFPR, 1994. 319p.
- GUGAN, D. J. Practical Aspects of Topographic Mapping from SPOT Imagery. **Photogrammetric Record**, v. 12, n. 69, p. 349-355, 1987.
- LUGNANI, J. B. **Introdução à Fototriangulação**. Editora da UFPR. Curitiba – PR. 1987.
- MACHADO E SILVA, A. J. F. **Geometria de imagens: do projeto do satélite à geração dos produtos**. 224 pp. Tese (Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.
- MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; McGLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. John Wiley & Sons, Nova York, 2001.
- MITISHITA, E. A.; SARAIVA, C. C. S.; MACHADO, A. L. Monorrestituição de imagens de satélite de alta resolução IKONOS 2 (Geo), utilizando-se da transformação DLT e Modelo Digital de Terreno. **Anais do XI SBSR**, Belo Horizonte, p. 357 - 364, 2003.
- ORUN, A. B.; NATARAJAN, K. A. Modified Bundle Adjustment Software for SPOT Imagery and Photography: Tradeoff. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, p. 1431-1437, 1994.
- PEDRO, P., ANTUNES, A., MITISHITA, E.. Ortoretificação de imagens de alta resolução utilizando os modelos APM (Affine Projection Model) e RPC (Rational Polynomial Coefficient). **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 13, n. 1, p. 60-75, 2007.
- RODRIGUES, T. L.; ANTUNES, M. A. H.; FOSSE, J. M. Avaliação da ortoretificação da imagem do sensor HRC do CBERS 2B utilizando modelo de funções racionais. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, XIV, 2009, Natal. **Anais...** Natal, p. 2139–2146, 2009.
- TOUTIN, T. Geometric processing of Remote Sensing images: models, algorithms and methods, **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n.10, p. 1893 - 1924, 2004.
- YAMAKAWA, T. AND FRASER, C. S. The affine projection model for sensor orientation: experiences with high-resolution satellite imagery. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 35, n. B1, p. 142-147, 2004.