

## Geometria de aquisição de estereopares em câmeras de imageamento linear de sensores orbitais passivos

Felipe André Lima Costa <sup>1</sup>  
Oscar Ricardo Vergara <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Imagens e Informações Geográficas do Exército (CIGEx) – SDT  
EPCT DF 001, Km 4,5- Setor Habitacional Taquari, Lago Norte, Brasília, DF, CEP 71559-901  
falcl@bol.com.br

<sup>2</sup> Instituto Militar de Engenharia (IME) - Seção de Ensino de Engenharia Cartográfica (SE/6)  
Praça General Tibúrcio 80, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, CEP 22290-270  
vergara@ime.eb.br

**Abstract.** Images captured from linear scanners are valued for their great potential to generate ortho-photos and updating map databases. The medium and high resolution linear scanners provide a challenge to traditional topographic mapping from aerial images. Based on this motivation and in the importance of the geometric modeling of linear array scanners with their epipolar line, this article brings a qualitative study about the geometry of stereopair images acquisition in pushbroom scanners sensors and its influence in epipolar line resampling. It's showed some geometric aspects in image acquisition in along-track and across-track systems. Considering the epipolar line resampling technique as a prerequisite to image matching in stereopair and digital elevation model (DEM) acquisitions, it's developed one algorithm for epipolar geometry resampling that doesn't use the attitude sensor parameters. So, it's evaluated the base-to-height ratio of 19 medium and high resolution stereopairs, such as CCD-CBERS 2, IKONOS 2, CARTOSAT 1 and FORMOSAT 2. The results show the efficiency in reduction of parallax epipolar line in cases that the base-to height ratio is between 0.6 and 1.0. As a consequence, these geometric characteristics should be observed during stereopairs acquisitions programming and this study can be used as a support for acquiring stereopairs from other sensors.

**Palavras-chave:** base-to-height ratio, pushbroom scanners, line cameras, epipolar geometry, relação base altura, câmeras *pushbroom*, câmeras de imageamento linear, geometria epipolar.

### 1. Introdução

Segundo Zhang (2005), com o melhoramento das câmeras *Charge-Coupled Device* (CCD), e da tecnologia dos semicondutores nas câmeras, os sistemas de sensores digitais, tanto orbitais quanto aerotransportados, têm ganhado aceitação para diversas aplicações. O autor considera que os benefícios desses sistemas incluem economia de tempo e de custos, além de possibilitar altas resoluções radiométrica e geométrica, mesmo em cenas que contenham feições pontuais que têm baixo contraste com o seu entorno. Para aplicações militares e civis, quando necessário, esses sistemas apresentam a facilidade de transmissão em tempo real das imagens, desde que se conte com estações de recebimento e uma banda de transmissão adequadas, além de adquirir simultaneamente imagens pancromáticas e multi-espectrais.

De acordo com Morgan (2004), os estereopares adquiridos a partir das câmeras CCD de varredura linear (conhecidos como *pushbroom scanners* ou *line cameras*) são de grande importância para a geração de ortofotos e atualização de mapas uma vez que apresentam a possibilidade de mapear grandes áreas com imagens adquiridas em intervalos de tempo que podem chegar a minutos. Assim, para uma melhor aplicabilidade da reconstrução tridimensional do espaço objeto a partir de imagens 2D de câmeras digitais, faz-se necessário uma geometria de aquisição dos estereopares que seja consistente.

Em função do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os aspectos geométricos inerentes às câmeras de alguns sensores existentes no mercado e as influências dessa geometria de aquisição na reamostragem da linha epipolar dos estereopares gerados. Nos testes apresentados neste trabalho destacam-se, em quantidade, os realizados em 12 pares estereoscópicos do sensor CCD-CBERS 2, adquiridos em 2004 e 2005.

## 2. Fundamentação Teórica

As câmeras que utilizam o princípio *Charged Coupled Device* (CCD) geram imagens digitais bi-dimensionais (matriz de pixels) que possibilitam a aquisição de estereopares através de duas possibilidades. A primeira é adquirindo imagens com variação do ângulo de rolamento (*roll*), assim, para os sensores que apresentam este tipo de geometria de aquisição, como por exemplo, o sensor CCD-CBERS 2, CCD-CBERS 2B, PAN/MS-SPOT 5 e FORMOSAT-2, as duas imagens de um estereopar são obtidas em órbitas laterais à área a ser imageada, com intervalos de dias entre as aquisições. Tal fato pode ocasionar diferenças radiométricas entre as imagens constituintes de cada estereopar e diferenças espectrais nos alvos (por exemplo em áreas de plantações) o que implica em problemas na extração de feições pontuais. A Figura 1 apresenta o esquema representativo da aquisição de estereopares com variação do ângulo de rolamento ( $\psi$ ) em torno do eixo X. Pode-se observar que a imagem 2 é gerada a partir da variação do ângulo de rolamento para direita (sentido positivo), ou seja, na lateral direita da direção de vôo da plataforma orbital.

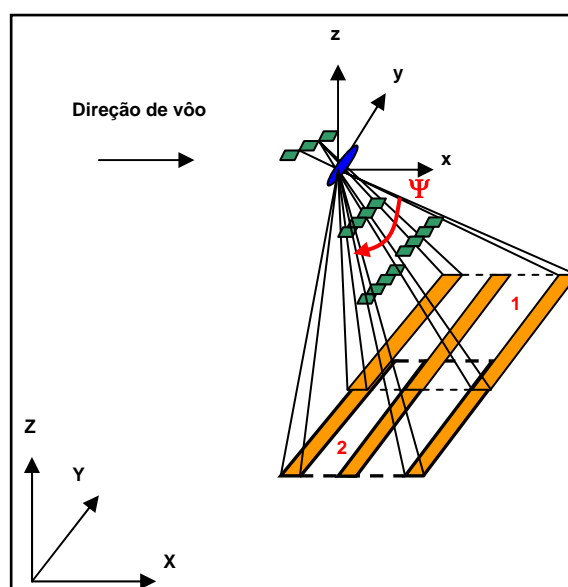


Figura 1. Esquema representativo da aquisição de estereopares de sensores de varredura linear com variação do ângulo de rolamento

A segunda possibilidade de obtenção de estereopares com sensores de varredura linear é utilizando a variação do ângulo de proa (*pitch*), no sentido para frente (*forward*) ou para trás (*backward*). Este tipo de imageamento traz a vantagem de reduzir para aproximadamente um minuto o intervalo de tempo de aquisição das imagens dos estereopares e, por conseguinte reduz a possibilidade de diferenças radiométricas e de diferenças espectrais nos alvos. Este sistema de imageamento é adotado pelos sensores IKONOS 2, CARTOSAT-1 e FORMOSAT-2. A Figura 2 ilustra o esquema representativo da aquisição de estereopares com variação do ângulo de proa, observando-se que após a geração da imagem 1, é gerada a imagem 2 com a variação do ângulo para frente (*forward*).

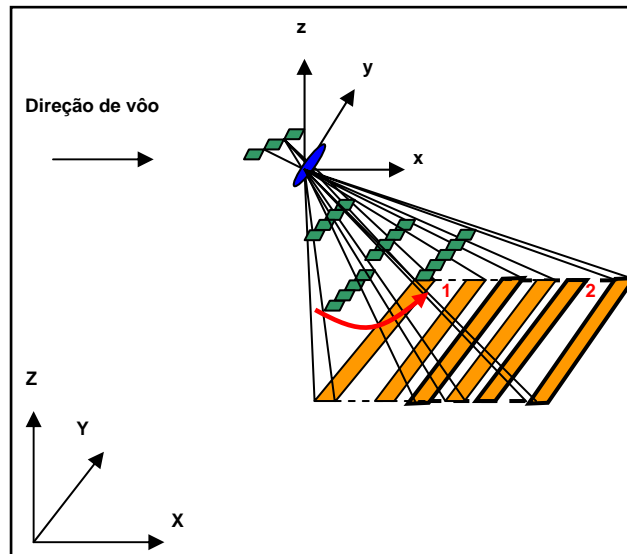


Figura 2. Esquema representativo da aquisição de estereopares de sensores de varredura linear com variação do ângulo de proa

Outro aspecto a ser destacado em ambos os casos mencionados (tomados ao longo ou lateralmente à órbita) recai nas características geométricas da aquisição de cada imagem constituinte do estereopar. No exemplo da Figura 3, considerando o ponto P a ser imageado tem-se o ângulo de elevação do sensor ( $\alpha$ ), ângulo de elevação do Sol ( $\beta$ ), o azimute da plataforma orbital ( $\delta$ ) e o azimute do Sol ( $\phi$ ) em relação ao Norte (N). Para a aquisição de imagens sem significativa presença de sombras nas feições terrestres, faz-se necessário utilizar um elevado ângulo de elevação do Sol ( $\beta$ ). Deve ser observado também o ângulo de elevação do sensor ( $\alpha$ ) para que a relação  $B/H$  esteja entre 0,6 e 1,0 (Toutin, 2004), onde B é a distância percorrida pela plataforma entre as duas aquisições e H a altitude da órbita de imageamento do sensor. Como será mostrado na seção 4 deste trabalho, esta relação tem influência direta na reamostragem da linha epipolar dos estereopares gerados.

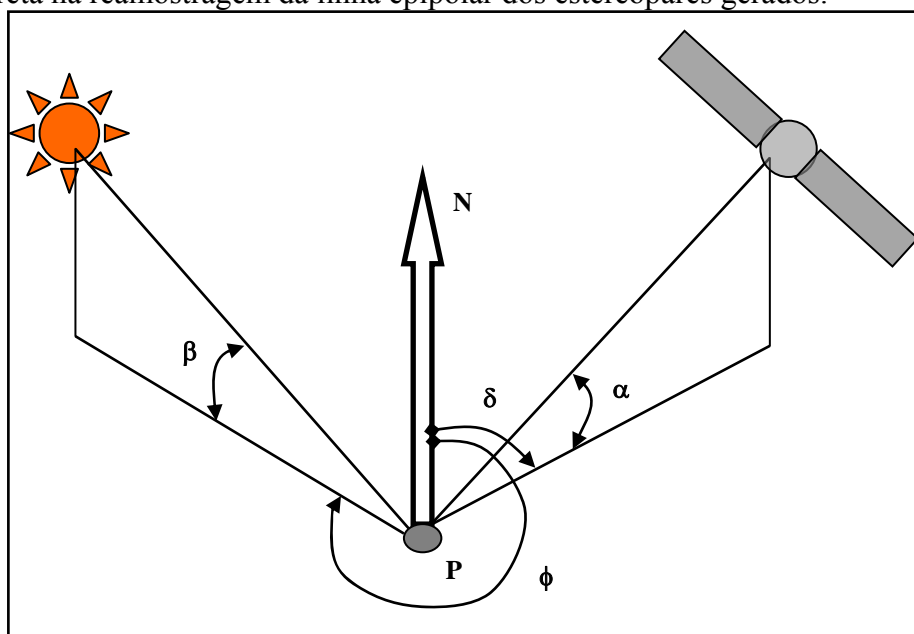


Figura 3. Geometria de aquisição de imagens orbitais: Adaptado de Grodecki e Dial (2001)

A reamostragem da linha epipolar das imagens constituintes de pares estereoscópicos é um pré-requisito para diversas aplicações fotogramétricas, tais como extração de DEM (*Digital Elevation Model*) e medição automática de pontos correspondentes. Trabalhos nessa linha de pesquisa são encontrados em Cho et al. (1992), cujo modelo requer o conhecimento dos parâmetros das orientações interior e exterior do sensor e em Morgan et al. (2004), que apresenta um modelo que não necessita dos parâmetros de atitude da plataforma. Para o presente trabalho foi utilizada uma modelagem com o diferencial de não utilizar os dados de orientação da plataforma orbital.

### 3. Metodologia

Foram utilizados os seguintes materiais: - 01 estereopar CCD-CBERS 2, bandas 2, 3 e 4. As imagens que compõem o par foram tomadas desde os *path/row* 159/121 (em 16/06/2004) e 154/121 (01/07/2004), ambas visando o *path/row* 156/121; - 11 estereopares CCD-CBERS 2, bandas 2, 3 e 4 com nível 2 de processamento (com correções radiométricas e geométricas) adquiridos no *path* 156 (visando o mesmo *path*), iniciando no *row* 111 até o *row* 121, adquiridas em 03/10/2005 e 06/10/2005; - 02 estereopares IKONOS 2, com nível 1 de processamento (correção radiométrica, sem correções geométricas), adquiridos no *parth/row* 157/764 em 16/06/2004; - 01 estereopar IKONOS 2, com nível 1 de processamento, adquiridos no *parth/row* 226/203 em 11/07/2007; - 02 estereopares CARTOSAT-1 *path/row* 1808/0498, bandas pancromáticas com nível 1 de processamento, adquiridos em 04/07/05 e 11/06/07; - 01 estereopar FORMOSAT – 2, banda pancromática, com nível 1A de processamento (somente correção radiométrica), obtidas nos *path/row* 119176000 e 119178000 em 23/06/2007 e - 01 estereopar FORMOSAT – 2, bandas multiespectrais 1, 2 e 3, com nível 1A de processamento (somente correção radiométrica), obtidas nos *path/row* 119175000 e 119177000 em 23/06/2007; - Software IDL 6.3.

A metodologia se propôs a avaliar os aspectos geométricos destes diferentes estereopares de média e alta resoluções a partir da reamostragem da linha epipolar, tomando-se preferencialmente o sensor CCD-CBERS 2 como exemplo nos cálculos da modelagem proposta.

#### 3.1. Reamostragem da linha epipolar dos estereopares

O procedimento da reamostragem da linha epipolar utilizou o algoritmo desenvolvido por Costa (2007), que consiste na geração de estereopares com baixa paralaxe vertical residual entre as imagens constituintes do par estereoscópico, a partir dos parâmetros de epipolaridade. Para uma melhor explicação geométrica tem-se a Figura 4 ilustrando a configuração da aquisição de um estereopar, em que o plano epipolar é o plano formado pelos pontos  $O$ ,  $O'$ ,  $P'$ ,  $P''$  e  $P$ . A intersecção entre o plano epipolar e os planos das imagens define a linha epipolar; por exemplo,  $r$  é a projeção da linha epipolar na imagem da esquerda e  $r'$  é a sua correspondente na imagem da direita. Como consequência desta propriedade, o ponto  $P''$ , homólogo de  $P'$  na imagem da direita, deve estar contido na linha  $r'$  e a diferença entre as coordenadas *linha* do ponto  $P'$  e do ponto  $P''$  deve ser próximo de zero, para minimizar a paralaxe vertical. Através da Figura 4 pode se observar também, que a formação do plano epipolar está relacionada tanto à Linha de Base quanto à Altura do sensor.

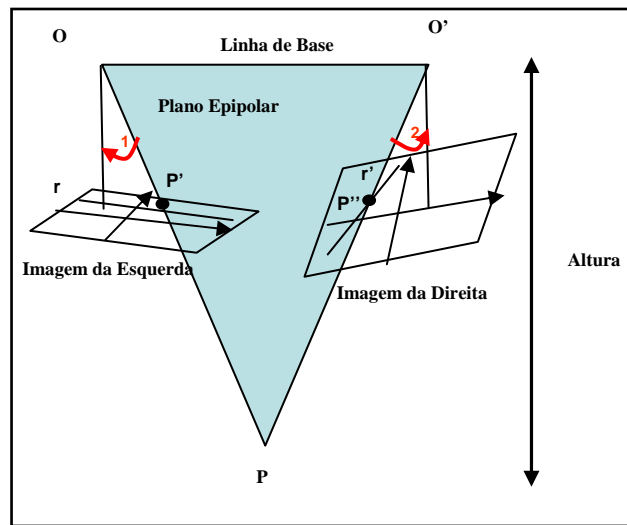


Figura 4. Geometria de aquisição de estereopares em câmeras de imageamento linear

Nesse contexto, o algoritmo consiste na geração das grades retificadas a partir de duas transformações nas imagens originais (referência e pesquisa). A primeira transformação consiste na geração das novas grades aplicando-se duas rotações, uma translação e um fator de escala. A segunda transformação consiste na reamostragem dos níveis de cinza para as novas grades regulares. Por conseguinte, os parâmetros de epipolaridade são fornecidos através da (Equação 1).

$$G1 \cdot x + G2 \cdot y + G3 \cdot x' + G4 \cdot y' = 1 \quad (1)$$

onde  $(x, y)$  e  $(x', y')$ , são respectivamente as coordenadas da mesma feição pontual nas imagens de referência e de pesquisa.

Os parâmetros  $G1$ ,  $G2$ ,  $G3$  e  $G4$  representam duas rotações, uma translação e um fator de escala, conforme descrito abaixo:

$$G1 = \frac{-\text{sen}(\theta)}{\Delta y} \quad G2 = \frac{\text{cos}(\theta)}{\Delta y} \quad G3 = \frac{S \cdot \text{sen}(\theta')}{\Delta y} \quad G4 = \frac{-S \cdot \text{cos}(\theta')}{\Delta y}$$

onde  $\theta$  representa a rotação na imagem de referência,  $\theta'$  a rotação na imagem de pesquisa,  $S$  o fator de escala na imagem de pesquisa,  $\Delta y$  a translação aplicada na imagem de pesquisa.

### 3.2. Cálculo da relação base-altura (B/H) dos estereopares utilizados

Nesta fase foram calculadas as relações B/H dos pares estereoscópicos a partir dos arquivos de metadados fornecidos pelo fabricante. Como exemplo, a Tabela 1 apresenta o recorte dos arquivos de metadados para o estereopar do sensor CCD-CBERS 2 de 2004, encontrando-se em destaque os ângulos de incidências do sensor, para cada tomada, que serão necessários para o cálculo de B/H.

Tabela 1. Recorte dos arquivos de metadados do estereopar CCD-CBERS 2: (a) Cena 1; (b) Cena 2

Cena 1 ( <i>path/row</i> 159/121 de 16/06/2004)		Cena 2 ( <i>path/row</i> 154/121 de 01/07/2004)	
Elevação do Sol	41,6 graus	Elevação do Sol	38,9 graus
Azimute do Sol	30,4 graus	Azimute do Sol	36,2 graus
Ângulo de incidência	<b>-18,6 graus</b>	Ângulo de incidência	<b>17,0 graus</b>

Assim, a partir destes ângulos de incidência e considerando como 778 km a altitude do sensor, tem-se que o valor aproximado da Linha de base foi igual a:

$$B = 778 \cdot \text{tg}(-18,60) + 778 \cdot \text{tg}(17,03) \Rightarrow$$

$$B = 500,14 \text{ Km}$$

Logo a razão B/H é  $500,14/778 = 0,64$  para este caso. Analogamente, para os demais pares estereoscópicos foi realizado tal procedimento, valendo a ressalva de que em alguns arquivos de metadados, por exemplo, o do sensor IKONOS 2, o ângulo de incidência ( $90-\alpha$ ) é substituído pelo ângulo de elevação ( $\alpha$ ), sendo o primeiro complementar do segundo Figura 3.

#### 4. Resultados

Através do algoritmo de reamostragem da linha epipolar, foram obtidos os parâmetros de epipolaridade a partir dos quais foram gerados os novos estereopares. Para o estereopar CCD-CBERS 2, *path/row* 156/121 de 2004, com nível 1 de processamento, os parâmetros de epipolaridade são apresentados na Tabela 2. Pode ser observado que o fator de escala relativo entre as imagens do estereopar é 1,00, o que evidencia não haver diferenças de escala nas imagens constituintes do par. Para a aquisição deste par estereoscópico a relação B/H foi igual 0,64, que se encontra dentro do intervalo de valores considerado adequado na literatura, sendo a paralaxe vertical reduzida em aproximadamente 83%.

Tabela 2 – Parâmetros da reamostragem da linha epipolar para o estereopar CCD-CBERS 2

Parâmetros de epipolaridade	Valores
$\theta$ (graus)	1,46
$\theta'$ (graus)	-1,10
S	1,00
$\Delta y$ (pixels)	-167,00

Da mesma maneira, para o sensor IKONOS 2, tem-se os parâmetros apresentados na Tabela 3. Pode ser observado que os ângulos de rotação das imagens são aproximadamente iguais, uma vez que estes estereopares são adquiridos na mesma órbita. O fator de escala apresentado é aproximadamente 1,00, não havendo variação de escala entre as imagens do estereopar. Para este par estereoscópico, a relação B/H foi igual a 0,59, quase atingindo o valor do limiar inferior de 0,6; sendo a paralaxe vertical reduzida em 73%.

Tabela 3– Parâmetros da reamostragem da linha epipolar para o estereopar IKONOS 2

Parâmetros de epipolaridade	Valores
$\theta$ (graus)	-78,33
$\theta'$ (graus)	-78,31
S	0,99
$\Delta y$ (pixels)	-14,38

Entretanto, para os estereopares do sensor CCD-CBERS 2, adquiridos em 2005 no *path* 156, desde o *row* 111 até o 121, com nível 1 de processamento e cuja relação B/H ficou fora dos limites de 0.6 a 1.0 (Toutin, 2004), a aplicação do algoritmo não possibilitou a redução da paralaxe vertical. Por exemplo, no estereopar de *path/row* 156/121, os resultados mostraram um valor de paralaxe residual de 100 pixels a partir das novas imagens geradas, tendo como causa possível para este fato a baixa relação B/H = 0,12, que será apresentada no próximo parágrafo. A Figura 5 ilustra graficamente as condições geométricas de aquisição desses estereopares, onde 1 e 2 representam, respectivamente, o ângulo de incidência da primeira imagem do estereopar (-7 graus) e o ângulo de incidência da segunda imagem (0 graus). Como pode ser visualizado, estas condições geométricas interferem na geração do plano epipolar em comparação à geometria apresentada na Figura 4.

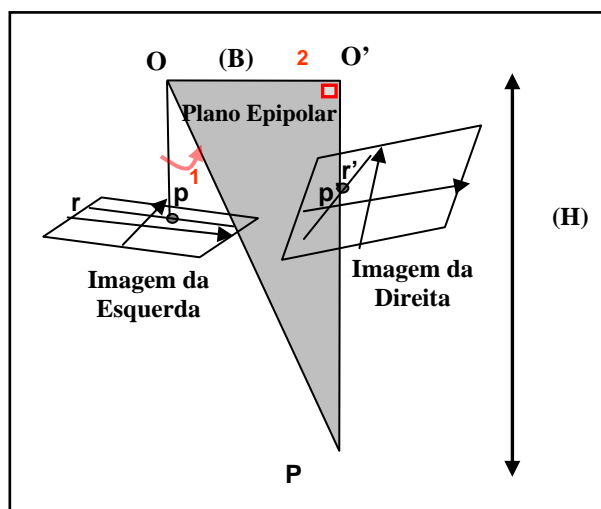


Figura 5. Geometria de aquisição dos 11 estereopares CCD-CBERS 2 de 2005

Os cálculos das relações B/H dos estereopares apresentados na seção 3 são mostrados na Tabela 4, em que são destacados, dentre outros aspectos, dados relativos às geometrias de aquisição e às resoluções geométricas dos sensores. Neste estudo procurou-se abordar uma significativa quantidade de sensores. Na Tabela 4, encontram-se sublinhados os estereopares que apresentaram as relações B/H aproximadamente entre 0.6 e 1.0 e suas respectivas paralaxes residuais após a aplicação do algoritmo de reamostragem da linha epipolar.

Tabela 4 – Características geométricas dos 19 estereopares de média e alta resoluções

Número de estereopares – Sensor	Data de aquisição	B/H	Geometria de aquisição do estereopar	Ângulos de incidência (graus)	Resolução (m)	Paralaxe residual (pixels)
<u>01-CCD CBERS 2</u>	16/06/2004 01/07/2004	<u>0,64</u>	Lateral a órbita	-18,6/ +17,03	20 m	<u>17</u>
11-CCD CBERS 2	03/10/2005 06/10/2005	0,12	Lateral a órbita	-7,73/ 0,00	20 m	100
<u>02-IKONOS 2</u>	16/06/2004	<u>0,59</u>	Ao longo da órbita	+ 15,15/ -17,63	1 m	<u>14/11</u>
<u>01-IKONOS 2</u>	11/07/2007	<u>0,77</u>	Ao longo da órbita	+ 26,21/ - 15,87	1 m	<u>3</u>
01-CARTOSAT 1	04/07/2005	1,37	Ao longo da órbita	+ 34,39/ - 34,39	2,5 m	1000

01-CARTOSAT 1	11/06/2007	1,13	Ao longo da órbita	+ 29,56/ - 29,56	2,5 m	720
01-FORMOSAT 2 PAN	23/06/2007	0,45	Ao longo da órbita	+ 13,24/ - 12,22	2 m	924
01-FORMOSAT 2 MS	23/06/2007	0,45	Ao longo da órbita	+ 13,05/ - 12,40	8 m	924

A observação da Tabela 4 associada aos cálculos dos parâmetros de epipolaridade mostra a intrínseca relação entre a geometria epipolar e a razão B/H. A redução da paralaxe vertical foi obtida nos estereopares com a relação B/H entre 0,6 e 1,0 estando em concordância com o estudado por Toutin (2006).

## 5. Análise dos resultados e conclusões

O estudo abordou 19 estereopares, de média e alta resoluções, para observar a relação entre a razão B/H e a geometria epipolar em sensores de imageamento linear. Dos 19 estereopares, o do sensor IKONOS 2 de 2007 foi aquele que apresentou a redução da paralaxe vertical mais significativa (de 48 para 3 pixels), tendo como relação B/H um valor igual a 0,77. Os estereopares FORMOSAT 2 (B/H=0,45), CARTOSAT 1 (B/H=1,37) e CARTOSAT 1 (B/H=1,13) não apresentaram uma significativa diminuição na paralaxe vertical residual, ficando este valor em torno de 924 pixels, 1000 pixels e 720 pixels, respectivamente. Nos 11 estereopares do sensor CCD-CBERS 2, cuja relação B/H foi igual a 0,12, não foi possível reduzir a paralaxe vertical significativamente e o valor residual foi de 100 pixels aproximadamente. Tal fato foi diferente do estereopar de 2004, cuja relação B/H foi de 0,64 com paralaxe residual de 17 pixels, podendo isto ser explicado pelas condições geométricas de aquisição dos mesmos, ou seja, as reduções mais significativas de paralaxe mais significativas aconteceram nos estereopares dos sensores com razão B/H dentro do intervalo 0,6 – 1,0. Estes resultados devem ser conferidos em avaliações futuras com aplicação do modelo desenvolvido em mais estereopares de diferentes sensores, sugerindo-se a aplicação da modelagem nos estereopares das câmeras CCD e HRC do sensor CBERS 2B.

Outra vantagem mostrada pelo algoritmo desenvolvido foi a possibilidade de reamostrar a linha epipolar sem necessidade de conhecer os parâmetros de orientação do sensor, o que permitiria avaliar o seu desempenho em pares estereoscópicos de outros sensores de média e alta resolução.

## 6. Agradecimentos

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e às empresas Space Imaging, Hiparc Geotecnologia e GISPLAN por terem cedido as imagens usadas neste trabalho.

## Referências

- Cho, W.; Schenk, T.; Madani, M. Resampling Digital Imagery to Epipolar Geometry. IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29 (B3), pp. 404-408. 1992.
- Costa, F. A. L. Extração Semi-Automática de Feições Pontuais em Estereopares de Sensores Orbitais Passivos. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. 2007.
- Grodecki, J.; Dial, G. IKONOS Geometric Accuracy. Proceedings of ISPRS Joint Workshop "High Resolution Mapping from Space", Hanover, Germany, 19-21 Setembro (CD-ROM). 2001.



Morgan, M. Epipolar Resampling of Linear Array Scanner Scenes, PhD Dissertation. Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada. 2004.

Morgan, M.; Kim, K.; Jeong, S.; Habib, A. Epipolar Geometry of Linear Array Scanners Moving with Constant Velocity and Constant Attitude. XXth Congress of ISPRS. 2004.

Toutin, T. Comparison of Stereo-Extracted DTM from Different High Resolution Sensors: SPOT-5, EROS-A, IKONOS-II, and QuickBird. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 42 (10). 2004.

Toutin, T. Generation of DSMs from SPOT-5 in-track HRS and Across-track HRG Stereo Data Using Spatiotriangulation and Autocalibration. ISPRS Journal of Photogrammetric & Remote Sensing, Canada, Vol. 60, pp. 170-181. 2006.

Zhang, L. Automatic Digital Surface Model (DSM) Generation from Linear Array Images. PhD Dissertation, Report No. 88, Institute of geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland. 2005.