

# Correção geométrica de imagens CBERS: o modelo de coplanaridade baseado em feições retas

Nilcilene das Graças Medeiros<sup>1</sup>  
Antonio Maria Garcia Tommaselli<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas  
Departamento de Cartografia- UNESP/FCT  
Caixa Postal 467 -19060-900 - Presidente Prudente – SP, Brasil  
ngmedeiros@gmail.com.br

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista – UNESP/FCT  
Departamento de Cartografia  
Caixa Postal 467 -19060-900 - Presidente Prudente – SP, Brasil  
tomaseli@fct.unesp.br

**Abstract.** The aim of this paper is to present a model for exterior orientation of pushbroom sensors that allows estimating the polynomial coefficients describing the platform trajectory using only linear features as ground control. Considering that pushbroom image acquisition is not instantaneous, six EOP (Exterior Orientation Parameters) for each scanned line must be estimated. The sensor position and attitude parameters are modeled with a time dependent polynomial. The relationship between a straight line in the image space and its homologous in the object space is established considering the principle that the viewing vector containing image point and the normal vector to the projection plane in the object space are orthogonal. The model based on collinearity equations using points adapted to the pushbroom geometry were also implemented aiming at the comparison of both techniques. Some experiments with simulated and real data were accomplished. For synthetic data an image was simulated with similar characteristics of an image CBERS, for real data were used a scene CBERS band 4 level 1. The obtained results showed that the presented model can be used to estimate the EOP of pushbroom images with suitable accuracy. Such parameters (EOP) can be used to accomplish the geometric correction of orbital images.

**Palavras-chave:** Pushbroom sensor, orientation images, CBERS image, coplanarity model, sensor de varredura linear, orientação de imagens, imagem CBERS, modelo de coplanaridade.

## 1. Introdução

A exatidão dos parâmetros de orientação das imagens orbitais é sabidamente deficiente, sendo necessária a correção da cena com dados de campo, na maioria dos casos. Vários modelos matemáticos são utilizados para esse propósito e, dentre eles, se destacam os modelos rigorosos e modelos paramétricos (POLI, 2004).

Muitos modelos geométricos foram propostos para a correção geométrica de imagens de varredura linear, como descrito em Gagan (1987), Orun e Natarajan (1994), Habib et al. (2000), Dowman et al. (2003), Poli (2004), dentre outros.

Como as imagens de varredura linear não são instantâneas, cada linha da imagem é tomada a partir de uma posição e orientação diferentes, ao contrário de sensores de quadro, que possuem um único grupo de parâmetros de orientação exterior (POE) para cada imagem (POLI, 2004). A determinação indireta destes parâmetros requer pontos de controle, cuja medição e campo e identificação na imagem é outra fonte de dificuldades.

Um método alternativo para correção geométrica preconiza o uso de feições retas como controle de campo. Exemplos desse tipo de entidade são bordas de construções, rodovias, limites de propriedades, dentre outras feições. Tais feições são mais fáceis de serem reconhecidas e extraídas automaticamente em imagens digitais, enquanto que a detecção e a medição automática de pontos são mais complexas, sendo realizadas de forma interativa, ou seja, com intervenção humana.

O objetivo principal deste trabalho é apresentar o modelo matemático de coplanaridade para retas, que relaciona os espaços imagem-objeto de imagens orbitais usando linhas retas, permitindo a orientação indireta da imagem.

O modelo foi implementado em linguagem C++, e testado com dados simulados e reais correspondentes a uma imagem CBERS, que possui resolução espacial de 20m. Também foram realizados experimentos com pontos de controle usando as equações de colinearidade adaptadas à geometria de varredura linear (DOWMAN e MICHALIS, 2003), com a finalidade de avaliar a técnica proposta.

## 2. Modelo Matemático

O modelo de orientação baseado em coplanaridade usando feições retas tem por princípio a condição de coplanaridade entre o vetor que contém um ponto em uma dada reta no espaço imagem (vetor de visada) e o plano de projeção no espaço objeto. Como consequência o vetor normal a este plano, uma vez rotacionado, deve ser ortogonal ao vetor de visada (Figura 1). Apesar de ter um desenvolvimento diferente, esse modelo possui o mesmo princípio usado por Mulawa e Mikhail (1988) e Habib et al. (2000).

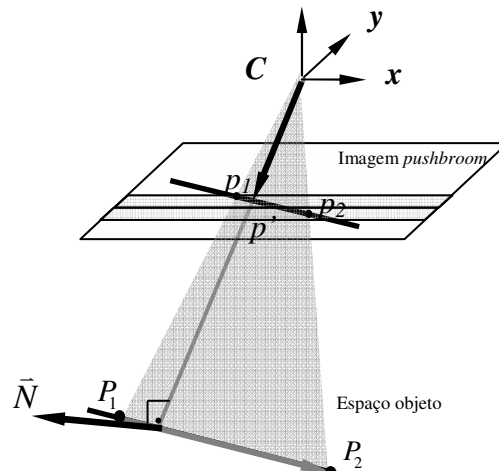


Figura 1 - Geometria do um vetor de visada de um ponto  $p'$  no espaço imagem e o vetor normal da reta no espaço objeto.

A condição de ortogonalidade entre o vetor de visada com o vetor normal ao plano de projeção no espaço objeto, pode ser expressa pela Equação 1, considerando o eixo  $y$  na direção da órbita, o que torna esta coordenada nula para um determinado instante  $t$ :

$$\vec{N}R^T \begin{pmatrix} x_t \\ 0 \\ -f \end{pmatrix} = 0 \quad (1)$$

onde:

$\vec{N}$  é o vetor normal no espaço objeto;

$R^T$  é a matriz de rotação transposta, na qual a rotação em torno no eixo  $y$  ( $\phi$ ) foi considerada nula;

$(x_t, 0, -f)$  é o vetor de visada do ponto  $p$  no espaço imagem, que incorpora a coordenada  $x$  para um determinado instante  $t$  de tempo;  $f$  é a distância focal.

$$R = \begin{bmatrix} \cos \kappa_s & \cos \omega \sin \kappa_s & \sin \omega \sin \kappa_s \\ -\sin \kappa_s & \cos \omega \cos \kappa_s & \sin \omega \cos \kappa_s \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde:  $\kappa_s = \kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2$ .

Com a pré-multiplicação do vetor de visada no espaço imagem pela matriz de rotação transposta ao vetor normal da reta no espaço objeto, tem-se:

$$\Delta Y \cdot (Z - Z_s) - \Delta Z \cdot (Y - Y_s) \cdot (\cos \kappa \cdot x_t) + \Delta Z \cdot (X - X_s) - \Delta X \cdot (Z - Z_s) \cdot (\cos \omega \cdot \text{sen} \kappa \cdot x_t - \text{sen} \omega \cdot f) + \Delta X \cdot (Y - Y_s) - \Delta Y \cdot (X - X_s) \cdot (\text{sen} \omega \cdot \text{sen} \kappa \cdot x_t - \cos \omega \cdot f) = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} X_s &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\ Y_s &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\ Z_s &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\ \kappa_s &= \kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2 \end{aligned} \quad (4)$$

onde:

$X, Y, Z$  coordenadas de um ponto da reta no referencial de terreno;

$X_s, Y_s, Z_s$  são as coordenadas do Centro Perspectivo do sensor no referencial do terreno num dado instante de tempo  $t$ ;  $\kappa_0$  é o ângulo de rotação para a primeira linha da imagem;  $a_i$  e  $b_i$  são variáveis a serem determinadas; devido às correlações, o parâmetro  $\omega$  foi considerado constante, sendo usado apenas o valor nominal;

$t$  é o número da linha imageada ( $t$  pode assumir o número da linha, pois os parâmetros  $a_i$  absorverão a diferença de escala entre  $a_i$  e  $t$ ).

O polinômio descrito (Equação 4) considera o grupo completo de 12 parâmetros, porém esse grupo pode ser reduzido para 8 parâmetros ou menos, a fim de evitar correlações entre parâmetros.

### 3. Experimentos e Resultados

Neste trabalho foram realizados experimentos com dados simulados e dados reais usando os modelos de colinearidade com pontos (MCP) e de coplanaridade com retas (MCR). As observações do espaço imagem, para dados simulados, foram geradas simulando-se uma imagem com características similares a de uma cena CBERS, e para dados reais, foram extraídas da imagem CBERS com realce prévio das feições de interesse na região Oeste do Estado de São Paulo.

As coordenadas de pontos e retas no espaço objeto, utilizadas tanto para dados sintéticos como para dados reais, foram coletadas em segmentos de rodovias levantados com receptor GPS (Figura 2a). Esses segmentos de rodovias são definidos pelas coordenadas de terreno no sistema de projeção UTM, Datum SAD69.

#### 3.1 Experimentos com dados simulados

Nos experimentos com dados simulados uma imagem sintética foi gerada de modo a considerar a geometria *pushbroom* da imagem CBERS, inclusive com o mesmo tamanho, dimensão de pixel, distância focal e altitude da plataforma.

Para gerar os parâmetros de orientação exterior ( $X_s, Y_s, Z_s, \kappa_s, \varphi, \omega$ ) para cada linha da imagem *pushbroom* simulada (Tabela 1), foram arbitradas as coordenadas e orientação aproximadas do CP da primeira linha ( $X_0, Y_0, Z_0, \kappa_0$ ) e os coeficientes polinomiais de 1ª e 2ª ordem ( $a_1, a_2, \dots, b_4$ ). Aos parâmetros angulares  $\varphi$  e  $\omega$  foram atribuídos valores zero para a geração dos POE simulados, devido à correlação com outros parâmetros.

Os valores simulados correspondentes aos POE ( $X_0, Y_0, Z_0, \kappa_0$ ) para  $t=0$ , foram definidos no sistema de projeção UTM, Datum SAD69. Os valores de  $a_1, \dots, b_4$  foram simulados de forma a inserir pequenas distorções nos POE da imagem formada. O parâmetro  $a_2$  corresponde à translação das linhas na imagem simulada, ou seja, o tamanho do pixel no terreno, na direção perpendicular a cada linha gerada.

Tabela 1 - Parâmetros de orientação exterior simulados.

POE	Parâmetros ( $t=1$ )	Coeficientes Polinomiais			
$X_0$ (m)	470880,04	$a_1$ (m)	5,0E-3	$b_1$ (m)	5,0E-8
$Y_0$ (m)	7467281,89	$a_2$ (m)	20	$b_2$ (m)	5,0E-7
$Z_0$ (m)	778000,00	$a_3$ (m)	5,0E-5	$b_3$ (m)	5,0E-6
$\kappa_0$ (rd)	-0,151968	$a_4$ (rd)	5,0E-8	$b_4$ (rd)	5,0E-11

**- Experimento 1: 12 parâmetros com 50 retas para MCR e 35 pontos para MCP**

Os primeiros testes realizados com os modelos de orientação utilizaram um grupo de 12 parâmetros, para modelar os POE da cena. Para a realização desses testes (Tabela 2), foram utilizadas 50 retas de controle (Figura 2a) e 35 pontos de controle (Figura 2b).

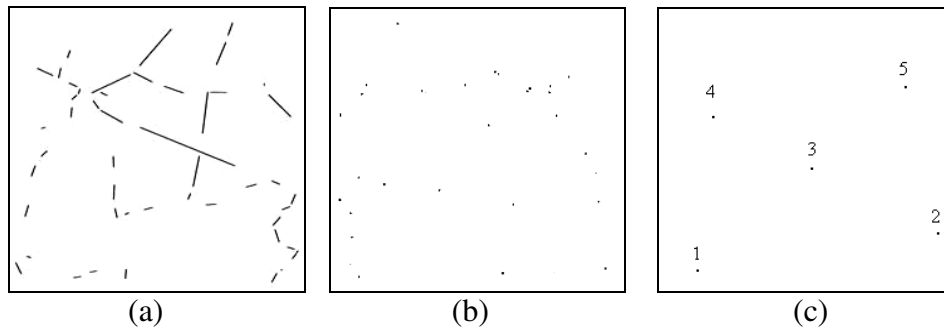


Figura 2 - Imagem simulada com características de uma imagem CBERS com agrupamento de 50 retas (a), 35 pontos (b), e 5 pontos de verificação (c).

Neste primeiro experimento, duas magnitudes de erros aleatórios foram inseridas nas coordenadas fotogramétricas simuladas, com desvios padrão de  $2\mu\text{m}$  e  $5\mu\text{m}$  para o modelo de retas e  $5\mu\text{m}$  e  $13\mu\text{m}$  para o modelo com pontos. O teste estatístico com a distribuição qui-quadrado  $\chi^2$  foi feito para todos os experimentos realizados.

Tabela 2 - Resultados obtidos com o MCR usando 50 retas e MCP usando 35 pontos.

POE e coef	MCR				MCP			
	2 $\mu\text{m}$		5 $\mu\text{m}$		5 $\mu\text{m}$		13 $\mu\text{m}$	
	$\sigma_0=1$ e $\hat{\sigma}_0=0,062$		$\sigma_0=1$ e $\hat{\sigma}_0=0,161$		$\sigma_0=1$ e $\hat{\sigma}_0=0,036$		$\sigma_0=1$ e $\hat{\sigma}_0=0,096$	
	$\mathcal{E}_v$	$\hat{\sigma}_x$	$\mathcal{E}_v$	$\hat{\sigma}_x$	$\mathcal{E}_v$	$\hat{\sigma}_x$	$\mathcal{E}_v$	$\hat{\sigma}_x$
$X_0$ (m)	0,69	1,05	1,92	2,71	1,12	1,90	2,27	4,94
$Y_0$ (m)	0,52	0,21	1,08	0,55	0,97	1,90	2,87	4,94
$Z_0$ (m)	15,37	20,09	43,30	51,80	14,134	37,65	59,05	97,87
$\kappa_0$ (rd)	$1,8 \times 10^{-5}$	$5,9 \times 10^{-6}$	$4,7 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-5}$	$2,2 \times 10^{-5}$	$4,8 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$	0,00012
$a_1$ (m)	0,0005	0,00098	0,0017	0,00253	0,00078	0,0017	0,0021	0,00444
$a_2$ (m)	0,0006	0,00029	0,0019	0,00076	0,00084	0,0017	0,0021	0,00444
$a_3$ (m)	0,0172	0,02092	0,0477	0,05396	0,01826	0,0358	0,0786	0,09323
$a_4$ (rd)	$2,4 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-8}$	$6,8 \times 10^{-8}$	$3,2 \times 10^{-8}$	$1,6 \times 10^{-8}$	$4,6 \times 10^{-8}$	$4,4 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-7}$
$b_1$ (m)	$1,1 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-7}$	$4,0 \times 10^{-7}$	$4,8 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$3,2 \times 10^{-7}$	$4,1 \times 10^{-7}$	$8,3 \times 10^{-7}$
$b_2$ (m)	$1,4 \times 10^{-7}$	$6,8 \times 10^{-8}$	$4,3 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-7}$	$3,2 \times 10^{-7}$	$3,5 \times 10^{-7}$	$8,3 \times 10^{-7}$
$b_3$ (m)	$3,3 \times 10^{-6}$	$4,1 \times 10^{-6}$	$9,1 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-5}$	$3,6 \times 10^{-6}$	$7,0 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-5}$
$b_4$ (rd)	$5,9 \times 10^{-12}$	$2,9 \times 10^{-12}$	$1,4 \times 10^{-11}$	$7,5 \times 10^{-12}$	$2,6 \times 10^{-12}$	$9,0 \times 10^{-12}$	$6,2 \times 10^{-12}$	$2,3 \times 10^{-11}$

Os resultados mostraram (Tabela 2), como era esperado, que quanto maior a magnitude dos erros aleatórios, maiores são os erros nos parâmetros estimados e nos desvios-padrão estimados. Os valores dos desvios-padrão estimados são compatíveis com os erros verdadeiros, o que indica que o modelo estocástico utilizado é adequado.

Verifica-se que as discrepâncias mais significativas ocorreram no parâmetro  $Z_0$ . Tal fato pode ser explicado pela relação direta que esse parâmetro tem com a geometria de abertura do sensor. No caso do sensor CCD CBERS, o ângulo de abertura é muito pequeno, visto que possui uma distância focal de 520 mm e altitude da plataforma de 780 km, o que torna esse parâmetro ( $Z_0$ ) muito sensível a pequenas variações nas observações.

De modo geral, as abordagens se mostraram adequadas para recuperar os parâmetros de orientação, mas isso só pode ser afirmado com a projeção das observações para o espaço objeto usando os POE gerados para cada linha com as equações de colinearidade inversas (Tabela 3). Para isso, pontos de verificação foram selecionados (Figura 2c) para determinar o erro nas coordenadas destes pontos no terreno, considerando os POE estimados por cada abordagem com os maiores erros aleatórios.

Para os valores estimados com o MCP (Tabela 3), os erros nas coordenadas foram maiores para E, com aproximadamente 1,4 pixel, enquanto que para o MCR a ordem de grandeza dos erros foi de aproximadamente 1 pixel em E e subpixel em N.

Tabela 3 - Estatística dos pontos de verificação (PV).

Estatística dos Pontos de Verificação											
Média (m)				$\hat{\sigma}_x$ (m)				EMQ (m)			
MCR		MCP		MCR		MCP		MCR		MCP	
E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N
9,94	9,63	11,72	10,75	17,28	14,94	24,76	9,14	20,54	18,42	28,01	15,10

### - Experimento 2: 8 parâmetros com 50 retas para MCR e 35 pontos para MCP

A fim de verificar o modelo de polinômios mais adequado ao modelo estudado, foi realizado o segundo experimento com o polinômio de 1ª ordem. Vale ressaltar que neste caso os dados imagem também foram simulados com polinômio de 1ª ordem.

Neste experimento (Tabelas 4 e 5) os dados de campo usados foram os mesmos que no experimento 1, ou seja, 50 retas para o MCR (Figura 2a) e 35 pontos para o MCP (Figura 2b).

Tabela 4 - Resultados obtidos com o MCR e MCP usando polinômio de primeira ordem.

POE e coef	MCR				MCP			
	2 $\mu\text{m}$		5 $\mu\text{m}$		5 $\mu\text{m}$		13 $\mu\text{m}$	
	$\sigma_0=1$ e $\hat{\sigma}_0=0,097$		$\sigma_0=1$ e $\hat{\sigma}_0=0,209$		$\sigma_0=1$ e $\hat{\sigma}_0=0,036$		$\sigma_0=1$ e $\hat{\sigma}_0=0,088$	
	$\mathcal{E}_v$	$\hat{\sigma}_x$	$\mathcal{E}_v$	$\hat{\sigma}_x$	$\mathcal{E}_v$	$\hat{\sigma}_x$	$\mathcal{E}_v$	$\hat{\sigma}_x$
$X_0$ (m)	0,46	1,05	1,09	2,26	0,38	1,35	1,49	3,27
$Y_0$ (m)	0,38	0,24	1,33	0,52	0,72	1,35	2,31	3,27
$Z_0$ (m)	6,11	19,69	33,09	42,48	6,14	26,56	42,39	64,45
$\kappa_0$ (rd)	$1,7 \times 10^{-5}$	$5,5 \times 10^{-6}$	0,00002	0,000011	$2,1 \times 10^{-5}$	$3,4 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$	$8,2 \times 10^{-5}$
$a_1$ (m)	0,00017	0,00034	0,00042	0,000739	0,00015	0,00041	0,00063	0,00101
$a_2$ (m)	$9,4 \times 10^{-5}$	$9,7 \times 10^{-5}$	0,00055	0,000209	0,00018	0,00041	0,00045	0,00101
$a_3$ (m)	0,00308	0,00760	0,00992	0,016407	0,00245	0,00942	0,01713	0,02287
$a_4$ (rd)	$5,7 \times 10^{-9}$	$2,6 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-8}$	$5,8 \times 10^{-9}$	$7,2 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-8}$	$2,9 \times 10^{-8}$

Tabela 5 – Estatística nos 5 pontos de verificação (polinômio 1ª ordem).

Estatística dos Pontos de Verificação											
Média (m)				$\hat{\sigma}_x$ (m)				EMQ (m)			
MCR		MCP		MCR		MCP		MCR		MCP	
E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N
2,17	2,69	3,11	3,44	3,58	1,97	5,24	2,61	4,32	3,74	6,29	4,83

Os valores dos parâmetros estimados (Tabela 4) mostraram que o uso de um polinômio de primeira ordem permite uma melhor estimativa dos parâmetros, nos casos estudados.

De fato, com a modelagem linear do polinômio, os resultados melhoram consideravelmente, indicando que para as configurações estudadas o grupo de 12 parâmetros é inadequado. Para o MCP e MCR, o erro nas coordenadas em E que eram de 1,4 e 1 pixel, respectivamente, foram reduzidos ao nível subpixel.

### 3.2 Experimentos com dados reais

As coordenadas imagem dos vértices dos segmentos de rodovias foram determinadas usando a transformada de *Hough* e refinadas por um método de ajuste polinomial de retas (Bazan et al., 2008). Para os experimentos com o MCP, foram coletados 23 pontos de controle de modo manual na mesma base digital contendo as rodovias levantadas com GPS.

Dados de referência foram estimados para os POE e os coeficientes polinomiais de 1ª e 2ª ordem (Tabela 6), com 123 pontos de controle para comparação com os resultados obtidos com os POE estimados com o MCR e MCP.

Tabela 6 - POE estimados com 123 pontos e usados como referência (polinômio de 2ª ordem).

POE	Valor de $\sigma_0=1$ e $\hat{\sigma}_0=0,181$							
	Parâmetros	$\hat{\sigma}_x$	Coeficientes Polinomiais		$\hat{\sigma}_x$	Coeficientes Polinomiais		$\hat{\sigma}_x$
$X_{0(m)}$	470623,27	4,389	$a_{1(m)}$	4,3416398	0,00395720	$b_{1(m)}$	$6,16 \times 10^{-8}$	$7,27 \times 10^{-7}$
$Y_{0(m)}$	7467221,86	4,389	$a_{2(m)}$	18,996887	0,00395721	$b_{2(m)}$	$-8,23 \times 10^{-7}$	$7,27 \times 10^{-7}$
$Z_{0(m)}$	785948,10	86,827	$a_{3(m)}$	-0,050486	0,08687039	$b_{3(m)}$	$1,04 \times 10^{-5}$	$1,65 \times 10^{-5}$
$\kappa_{0(rd)}$	-0,15603706	0,00011	$a_{4(rd)}$	$-6,10 \times 10^{-8}$	$1,10 \times 10^{-7}$	$b_{4(rd)}$	$7,75 \times 10^{-12}$	$2,10 \times 10^{-12}$

Os desvios-padrão dos parâmetros estimados (Tabelas 6) apresentam-se com boa qualidade, e também coerentes, considerando os dois polinômios testados. Além disso, para verificar a qualidade da estimativa, foi realizada a projeção de observações para o espaço objeto usando os POE gerados para cada linha com as equações de colinearidade na forma inversa (Tabela 7), em 8 pontos de verificação (Figura 3c).

Tabela 7 - Estatística nos 8 pontos de verificação com o MCP (polinômio de 2ª).

Estatística dos Pontos de Verificação					
Média (m)		$\hat{\sigma}_x$ (m)		EMQ (m)	
E	N	E	N	E	N
-4,31	-6,92	9,49	7,44	10,55	10,50

Os erros nas coordenadas E e N (Tabela 7), apresentam-se na ordem de 1/2 pixel, e os erros apresentados são provavelmente observacionais. A estimativa dos POE com os 123 pontos de controle foi satisfatória e pode ser usada com referência para os experimentos com a técnica proposta, além dos experimentos com o MCP usando menor número de pontos.

**- Experimento 3: 12 parâmetros estimados com 50 retas para MCR e 23 pontos para MCP**

Neste teste foram estimados os parâmetros de um polinômio de segunda ordem (Tabela 6), que modelam os POE da cena. Foram usadas 50 retas para o MCR (Figura 3a) e 23 pontos para o MCP (Figura 3b). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8. A Tabela 9 mostra a estatística das discrepâncias resultante da projeção dos 8 pontos de verificação no espaço objeto usando os POE gerados para cada linha da cena.

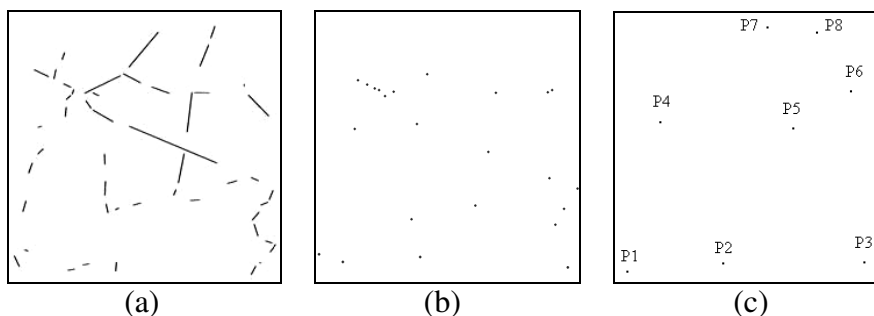


Figura 3 – Imagem mostrando 50 retas (a), 23 pontos de controle (b), e 8 pontos de verificação.

Tabela 8 - Resultados obtidos com o MCR e MCP.

POE e coef.	MCR		MCP	
	$\sigma_0=1$ e $\hat{\sigma}_0=0,444$		$\sigma_0=1$ e $\hat{\sigma}_0=0,257$	
	$\mathcal{E}_v$	$\hat{\sigma}_x$	$\mathcal{E}_v$	$\hat{\sigma}_x$
$X_0$ (m)	3,54	17,81	-26,82	12,43
$Y_0$ (m)	5,06	9,46	-24,47	12,43
$Z_0$ (m)	429,68	348,71	-302,09	235,22
$\kappa_0$ (rd)	0,000250	0,000286	0,000053	0,000299
$a_1$ (m)	-0,00907	0,016653	0,024129	0,013493
$a_2$ (m)	0,000656	0,007958	0,026617	0,013493
$a_3$ (m)	-0,30451	0,379443	0,24684	0,273821
$a_4$ (rd)	$-4,7 \times 10^{-7}$	$3,3 \times 10^{-7}$	$-3,2 \times 10^{-7}$	$3,4 \times 10^{-7}$
$b_1$ (m)	$2,2 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$-4,4 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-6}$
$b_2$ (m)	$-2,5 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$-5,3 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-6}$
$b_3$ (m)	$4,6 \times 10^{-5}$	$7,1 \times 10^{-5}$	$-3,9 \times 10^{-5}$	$5,6 \times 10^{-5}$
$b_4$ (rd)	$9,6 \times 10^{-11}$	$6,6 \times 10^{-11}$	$7,9 \times 10^{-11}$	$7,1 \times 10^{-11}$

Os resultados apresentados na Tabela 8 mostraram que os valores dos desvios-padrão estimados são compatíveis com os erros verdadeiros e as maiores diferenças apresentam-se no parâmetro  $Z_0$ .

Tabela 9 – Estatística das discrepâncias nos 8 pontos de verificação.

Estatística dos PV	MCR		MCP	
	$\mathcal{E}_v$ (m)		$\mathcal{E}_v$ (m)	
	E	N	E	N
Média	-9,00	-12,21	8,35	5,00
$\hat{\sigma}_x$	21,34	10,64	18,07	13,02
EMQ	23,41	16,85	20,15	14,08

Como pode ser observado na Tabela 9, os erros nas coordenadas E e N obtidos com os coeficientes polinomiais estimados com o MCR e MCP foram de aproximadamente 1 pixel em E e subpixel em N. Os melhores resultados foram obtidos com o MCP, apesar de ser pequena a diferença desses resultados com os resultados obtidos com o MCR.

Para todos os experimentos realizados, a hipótese básica do teste estatístico com a distribuição qui-quadrado  $\chi^2$  não é rejeitada ao nível de significância de 5%.

A técnica proposta que utiliza linhas retas apresentou resultados satisfatórios, e pode ser usada para recuperar os POE da cena. Deve-se levar em conta a facilidade de localizar estas linhas e a existência de bases de dados de rodovias para todo o país.

#### 4. Conclusões

A partir dos resultados obtidos pôde-se verificar que o modelo proposto recupera os coeficientes polinomiais satisfatoriamente, e pode ser usado para a correção de imagens de varredura linear.

Embora, o modelo de colinearidade usando pontos tenha apresentado melhores resultados, quando comparado com o modelo de linhas retas, a diferença é mais significativa para os valores do parâmetro  $Z_0$ . Vale ressaltar que os pontos utilizados no experimento possuíam uma boa distribuição geométrica na cena e que este caso ideal é de difícil obtenção.

Com relação à ordem do polinômio usado para descrever a variação dos parâmetros de orientação exterior quanto à trajetória da plataforma na tomada da cena, o modelo linear (8 parâmetros) mostrou-se mais adequado.

Outro aspecto importante a ser investigado em trabalhos futuros é quanto à quantidade e distribuição das observações, bem como a combinação de ambos os modelos em um processo simultâneo.

#### Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro destinado a essa pesquisa sob a forma de uma bolsa de estudo.

#### Referências Bibliográficas

- Bazan, W. S.; Tommaselli, A. M. G.; Galo, M.; Telles, S. S. S. Extração de feições retas com precisão subpixel: Estudo comparativo entre três métodos, Curitiba, **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.14, n. 1, p. 128-148, 2008.
- Dowman, I. J.; Michalis, P. Generic rigorous model for along track stereo satellite sensors. Hannover, ISPRS. **Workshop High Resolution Mapping from Space**, v. 34, 2003.
- Gugan, D. J. Practical Aspects of Topographic Mapping from SPOT Imagery. **Photogrammetric Record**, v. 12, n. 69, p. 349-355, 1987.
- Habib, A.; Asmamaw, A.; Kelley, D.; May, M. Linear Features in Photogrammetry. Report No. 450, **Department of Civil and Environmental Engineering and geodetic Science**, The Ohio State University, Columbus, 2000.
- Mulawa, D. C.; Mikhail, E. M. Photogrammetric treatment of linear features, Kyoto. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, ISPRS, p. 383- 393, 1988.
- 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.
- Poli, D. Orientation of Satellite and Airborne Imagery from Multi-Line Pushbroom Sensors with a Rigorous Sensor Model, Istanbul, Turkey. **Geo-imagery bridging continents**, ISPRS, v.20, p. 130-136, 2004.